

平成 28 年度 修士論文

微気流併用型放射空調システムによる快適性向上及び省エネルギー効果

首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 建築学域 一ノ瀬研究室

15886408 木下 碧子

指導教員 一ノ瀬雅之

目次

1	序	1
1.1	はじめに	1
1.2	従来空調による 28°C 設定オフィス	2
1.3	気流による冷却効果	2
1.4	放射空調の遍歴と対流併用型放射空調	3
1.5	論文の構成	4
2	微気流併用型放射空調を行うオフィス	8
2.1	はじめに	8
2.2	建築概要	9
2.3	空調システム概要	11
2.3.1	室内コンセプト	11
2.3.2	運用モード	12
2.3.3	詳細制御方法	13
3	検証計画と実測手法	20
3.1	はじめに	20
3.2	Y ビルにおける性能検証	21
3.2.1	設計フェーズの検証計画概要	22
3.2.2	運用フェーズの検証計画概要	27
3.3	測定手法と分析方法	31
3.3.1	温熱環境	33
3.3.2	サーマルマネキンを用いた測定	40
3.3.3	パネル単体性能	42
3.3.4	執務者アンケート調査	47
4	夏季冷房検証結果	54
4.1	はじめに	54
4.2	実測条件	55
4.2.1	気象条件	55
4.2.2	ペリメータ条件	58
4.3	設定温度緩和効果	63
4.3.1	システム性能と代表点温湿度	63
4.3.2	上下温度分布	65
4.3.3	表面温度と MRT	66
4.3.4	PMV	68

4.4	微気流の効果.....	69
4.4.1	定点風速分布	69
4.4.2	断面風速分布	70
4.4.3	可視化実験.....	71
4.4.4	温熱環境断面分布	72
4.4.5	サーマルマネキン結果.....	73
4.5	パネル単体性能試験.....	74
4.6	アンケート調査結果.....	76
4.6.1	基本情報.....	76
4.6.2	温冷感と湿度感.....	77
4.6.3	気流感	80
4.6.4	総合評価.....	81
4.7	微気流による快適範囲の拡大.....	82
4.7.1	分析に用いた実験条件.....	82
4.7.2	分析結果.....	83
4.8	まとめ	85
5	冬季暖房検証結果.....	88
5.1	はじめに.....	88
5.2	実測条件.....	89
5.2.1	気象条件.....	89
5.2.2	ペリメータ条件.....	90
5.3	温熱環境.....	93
5.3.1	システム性能と代表点温湿度.....	93
5.3.2	上下温度分布	94
5.3.3	表面温度と MRT	95
5.3.4	PMV.....	96
5.3.5	温熱環境断面分布	97
5.3.6	風速分布.....	98
5.4	アンケート調査結果.....	99
5.4.1	基本情報.....	99
5.4.2	温冷感と湿度感.....	100
5.4.3	気流感	102
5.4.4	総合評価.....	103
5.5	まとめ	104
6	シミュレーションによる省エネルギー効果検証	106
6.1	はじめに.....	106

6.2	エネルギー消費量の運用実績.....	107
6.3	The BEST Program を用いた熱負荷シミュレーション.....	108
6.3.1	建物モデル The BEST Program.....	108
6.3.2	建物モデル.....	109
6.3.3	熱負荷計算結果.....	111
6.4	LCEM tool を用いたエネルギー消費量シミュレーション.....	113
6.4.1	LCEM tool.....	113
6.4.2	空調システムモデル.....	114
6.4.3	入力条件の決定プロセス.....	121
6.4.4	エネルギー消費量計算結果.....	122
6.5	まとめ.....	123
7	総括.....	126

微気流併用型放射空調システムによる快適性向上及び省エネルギーの両立

15886408 木下 碧子
指導教員 一ノ瀬 雅之

1 研究の背景と目的

持続可能な社会を推進していく上で空調設備の省エネルギー化が重要視されている。社会的な施策の一つとしてクールビズによる空調設定温度を 28℃ に緩和することが推進されてきたが、従来の空調方式では温熱環境不満足者率の増加や、作業効率の低下に関する報告があるため、着衣の軽装化と同時に、放射や気流により室内環境を向上させることは極めて重要である¹⁾。このような背景から執務者の快適性と省エネルギー性を両立する技術として、近年では放射空調が注目されている。放射空調は冷却・加熱パネルの熱放射により室内温熱環境を調和する空調方式であり、従来の対流式空調と比較してドラフト感や温度分布が小さい空間を形成することができ、室内の放射温度を一定に保つことが可能である。また、水式放射空調は空気と熱交換の必要がないことから、搬送動力の低減や熱媒温度の緩和といった省エネルギー効果も期待される。一方で気流による冷却効果や変動風の快適性が明らかであることから²⁾、近年、放射空調に気流を付加する事例に関する研究報告も増加している。対流併用型放射空調による更なる快適性の向上が期待できるものの、いまだ知見は不足している。

以上の背景を踏まえて本研究は、先進的な対流併用型放射空調として設計された微気流併用型放射空調の有用性を検討する。水式天井放射空調に天井から吹き出す微気流を併用したこのシステムが採用されたオフィスビルを対象に実測を行うことで、空調方式による快適性向上と省エネルギー効果の両立を明らかにすることを目的とする。

2 微気流併用型放射空調を行うオフィス

2.1 建物概要

東京都千代田区に 2015 年に竣工した Y ビル（表 1）を対象に実測調査を行った。高断熱高気密な外皮をもち、西面開口部は外部遮蔽ルーバー、水平庇、クライマープラインド内蔵二重窓により日射遮蔽が行われる都市型環境建築である。内観を図 1 に示す。

表1 建物概要

所在地	東京都千代田区
用途	事務所
建築面積	2,059m ²
延床面積	22,574m ²
基準階面積	1,960m ²
構造	SRC,CFT,免震
階数	地下2,地上10階
軒高	39.5m
階高	3.85m
天井高	2.8m



図1 建物内観

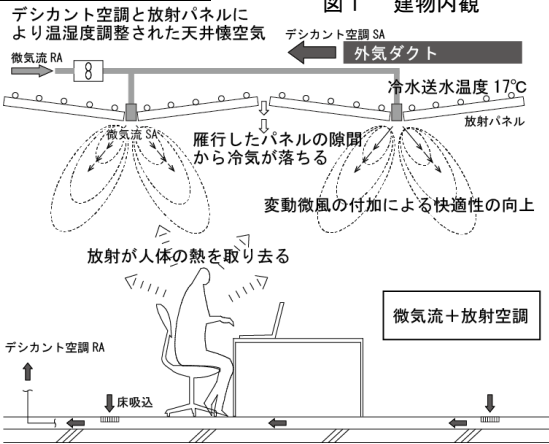


図2 微気流併用型放射空調室内概念図

2.2 空調システム概要

微気流併用型放射空調の概念を図 2 に示す。放射パネルを傾斜配置することにより天井に隙間をもたせ、居住域に自然対流による緩やかな空気循環を促す形状である。このパネルは天井内側も断熱しておらず、放射冷却とデシカント空調により温湿度調整された空気をファンにて居住域に微気流として吹き出す。温度、湿度、放射、気流の 4 要素を制御することによって快適性を追求した空調方式である。ペリメータはチルドビームを採用している。

表2 温熱環境検証フェーズ

		← 2014 年 →		← 2015 年 →		← 2016 年 →		← 2017 年 →					
		施工フェーズ		運用フェーズ									
		モックアップ実験		入居前検証		運用時検証							
		夏季冷房実験 10月15日～12月25日		夏季実測 7月25日～8月5日		冬季実測 1月30日～2月7日		中間季実測(春) 4月16日～4月24日		夏季実測 7月16日～8月14日		冬季実測 1月7日～1月21日	
室内 温熱 環境	測定・調査項目	空調設定値別 室内温熱環境		空調設定値別 室内温熱環境		運用時空調設定温度における室内温熱環境							
		手動測定		手動測定		手動測定				手動測定			
		アンケート調査		アンケート調査		アンケート調査				アンケート調査		アンケート調査	
						パネル性能試験							
	フィードバック	気流強さ[中]に決定		設定温度 27℃ に決定		ペリメータの風量変更を行うことが決定		外気冷房特性確認		27℃ 設定におけるアンケート評価確認		昨年度調整後のアンケート評価確認	

3 検証計画と実測手法

3.1 性能検証計画

Yビルは設計から運用まで一貫したコミッショニングが行われており³⁾⁴⁾、LEED-CS Platinumを取得している。本研究で対象とする室内温熱環境の検証行程を表2に示す。施工フェーズの2014年にモックアップを使用した被験者実験を行い、システムの仕様が決定された。夏季冷房検証は入居前と運用時に行い、入居前は設定温度と微気流の有無により表3に示す空調設定条件にて模擬負荷を設置して検証を行った。運用時は設定温度27°Cにおける室内温熱環境実測に加えて執務者アンケート調査を行った。冬季、中間季にも同様の検証を行ったが本研究では夏季冷房を対象とする。

3.2 温熱環境測定手法

測定点を図3に示す。インテリア2点(A,B)、ペリメータ1点(C)にて上下温度分布と湿度、グローブ温度の測定を行った。上下温度分布は高さ100mmから500mm間隔で熱電対を用いて測定した。風速の測定はインテリアには超音波三次元風速計、ペリメータには熱式風速計を設置して行った。また、室内環境の詳細断面分布を把握するために手動測定を行った。温熱環境は図4に示す移動計測機器を用いパネル5枚分を250mm間隔で測定した。風速は図5に示すメッシュ状の測定点にて5秒平均値を測定した。

3.3 アンケート調査手法

室内環境に対する執務者の評価を明らかにするため、8月5日から8月10日の期間中に5階執務者を対象にアンケート調査を行った。項目は基本情報9問、温冷感4問、湿度感や満足度を含んだ執務環境全般10問に加えて、夏季は気流感4問にて構成した。回答方法として、羽田ら⁵⁾の手法を参考にスケールバー上で任意の箇所に申告する連続尺度を採用した。

3.4 パネル単体性能評価手法

放射率の異なる熱流センサを組み合わせて用いることで、放射パネル単体の能力を放射成分と対流成分に分離して求める。センサは半導体を用いた熱センサのRAFESPAを使用した。このセンサは熱流密度と壁面や熱流計表面の放射率の間に線形の特性を持つため、線形補間による各熱流量の算出が可能である。また使用センサの平均感度は約 $11.91\mu\text{V/W}\cdot\text{m}^2$ であるため精度よく測定ができる。測定には加工のない熱流計(放射率 $\alpha_1=0.85$)とアルミ蒸着を施した熱流計(放射率 $\alpha_2=0.05$)を使用し、式(1)~(3)を用いて各熱量を算出する。

$$\gamma = (q_1 - q_2) / (\alpha_1 - \alpha_2) \quad (1)$$

$$q_{pc} = q_1 - \gamma\alpha_1 \quad (2)$$

$$q_{pr} = \gamma\alpha_p \quad (3)$$

図6は測定点を示す放射パネル断面図である。パネルは配管、ヒートシンク、アルミパネルから構成される。予備実験よりヒートシンクの影響で室内側に低温域と高温域が現れることが確認されたため、天井側3点、室内側2点で測定を行った。

4 夏季冷房時快適性検証結果

4.1 設定温湿度別室内環境

図7におんどとりで測定した定常時(10時~17時)の空気状態をプロットした結果を示す。天井パネル裏側の空気温度は室温と同等であり、微気流吹出し空気は27°C設定にて室温より約0.23K高く、デシカント給気の影響により湿度は約0.0005kg/kg(DA)低くなり、エンタルピーは約1.14kJ/kg(DA)低いことがわかる。また、室温は設定温

表3 2015年入居前夏季検証空調設定条件スケジュール

	7/29	7/30	7/31	8/1	8/2	8/3	8/4
設定温度	26°C	28°C	27°C	26°C	27°C	28°C	26°C
微気流	あり			なし			あり

※模擬負荷はブラックライト25W/m²、気化式加湿器10.15mL/hを設置



図3 機器設置点

※2015年夏季実測及び2016年夏季実測パネル性能評価のみ8階で行い、その他は全て5階で行った。



図4 移動計測機器

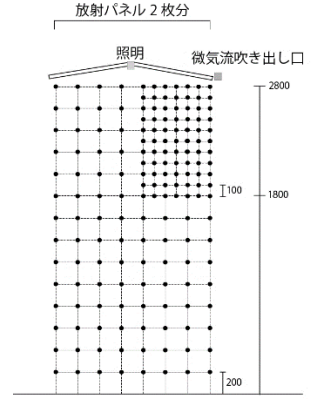


図5 断面風速分布測定点

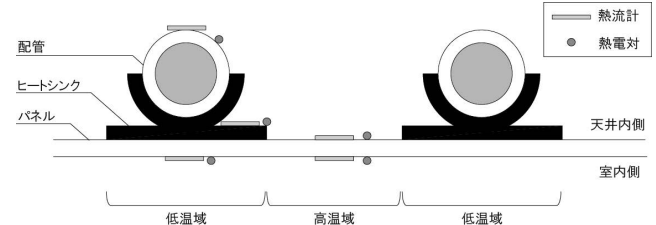


図6 パネル測定点

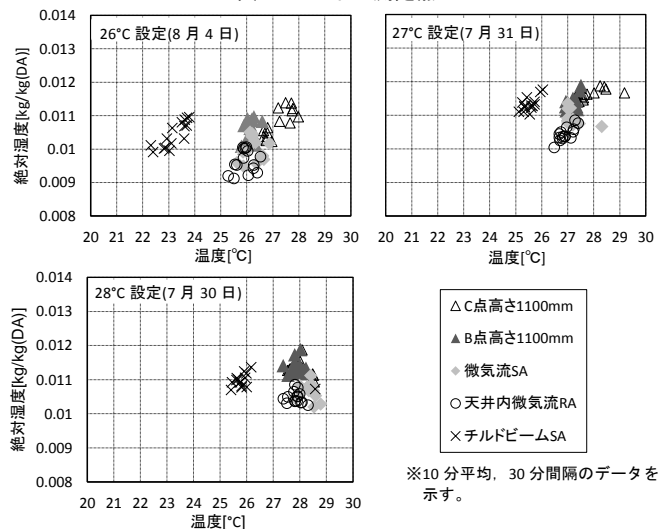


図7 吹き出し温湿度

度 $\pm 0.65\text{K}$ 以内となることが確認された。また 26°C 、 27°C 設定においてペリメータ室温はインテリア室温よりも約 1K 高かった。

図 8、図 9 に「微気流あり」の上下温度分布を示す。 28°C 設定において足元の温度が低いことは前日の実験条件による影響が考えられるが、 26°C 、 27°C 設定において居住域($100\text{mm}\sim 1600\text{mm}$)上下温度差は設定温度 $\pm 0.5\text{K}$ 以内である。運用時の結果も時間に関わらず居住域上下温度差は 0.11K 以内となり、天井放射空調の長所が Y ビルでも確認された。

表 4 に高さ 1100mm における形態係数^(注1)を示す。図 10 にパネルと壁面の表面温度、MRT の定常時変動を示す。形態係数は 6%の壁面に対してパネルが 28%を占めている。またパネルの影響によって壁面温度は室温と同じ温度となり、どの設定温度においても MRT の変動域は小さく、1 日を通して安定した体感温度が得られることが明らかとなった。図 11 に運用時における同様の結果を示す。放射パネルの影響を受ける壁や床、家具の表面温度中央値は全て室温 $\pm 0.5\text{K}$ 以内であることが確認できる。MRT は室温より約 1.1K 低く四分位範囲が 0.35K であることから、冷却感が得られ、1 日を通して温度変動が小さい執務空間が形成されていることが明らかとなった。

表 5 に PMV の算出結果を示す。 27°C 設定で PMV が 0.32 となることから設定温度の緩和が可能であることが示唆される。

4. 2 微気流の有無による室内環境

図 12 に定常時の風速の 10 分平均値を示す。「微気流なし」で 0.1m/s 程度で概ね一定であった風速が、「微気流あり」において $0.1\sim 0.18\text{m/s}$ の間で変動することが確認でき、モックアップ実験で最適とされた 0.17m/s に近い気流となることを確認した。図 13、図 14 に断面風速分布を示す。結果から、居住域では高さによらず同様の結果が得られることがわかった。

図 15 に「微気流なし」、図 16 に「微気流あり」の 27°C 設定における断面温度分布を示す。「微気流なし」でも雁行したパネルの隙間から冷気が垂れ下がることを確認でき、設計趣旨が温熱環境に反映されたことがわかる。気流を付加することによって天井付近に滞留した冷気の流れを促進し、「微気流なし」のケースと比較して温度の低い執務空間が形成された。結果から放射空調を対流併用型にすることの有用性が明らかとなった。

4. 3 アンケート調査結果

アンケート回答者は 85 名であり、体調を不調と回答した 2 名を除いた 83 名の回答で分析を行った。30 代が 42%、40 代が 34%を占め、うち約 42%が女性である。図 17 に部位別温冷感申告結果を示す。申告は連続尺度を用いたため、ISO7730⁽⁶⁾の推奨値である $\text{PMV}\pm 0.5$ を参考に 7 段階評価に分類した。結果は足元から頭部まで温冷感申告

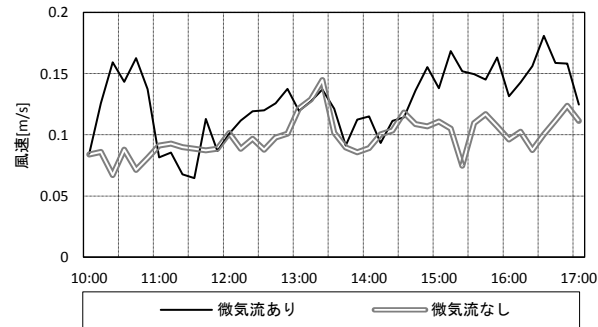
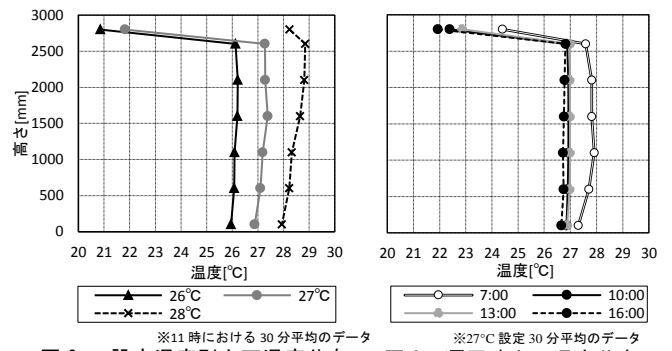


図 12 居住域風速



※11 時における 30 分平均のデータ

※27°C 設定 30 分平均のデータ

図 8 設定温度別上下温度分布 図 9 運用時上下温度分布

表 4 形態係数

パネル	天井	照明	窓	壁	床	家具
28%	6%	4%	3%	6%	22%	31%

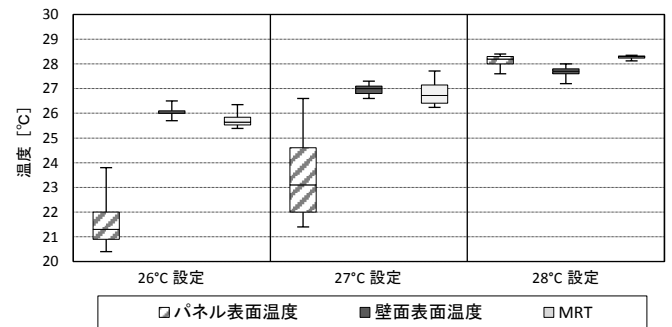


図 10 設定温度別温度変動域

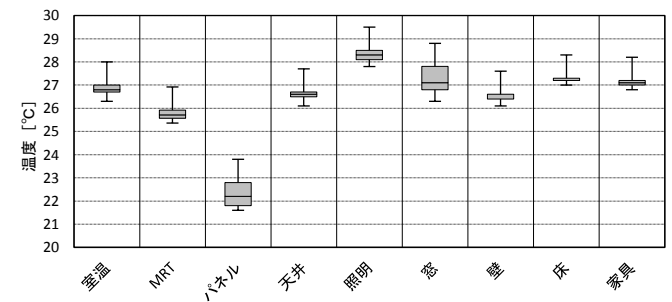


図 11 運用時温度変動域

表 5 PMV と室内温熱環境 (代謝量 1.1met , 着衣量 0.5clo)

設定室温	パネル表面温度 [°C]	室温 [°C]	湿度 [%]	風速 [m/s]	PMV [-]
26°C	20.9	26.1	47.3	0.127	-0.04
27°C	21.8	27.2	49.9		0.32
28°C	28.2	28.3	45		0.85

※11 時における 30 分平均データ

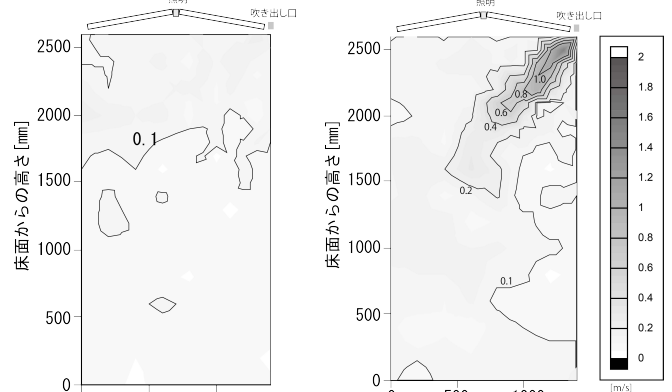


図 13 断面風速分布(微気流なし)

図 14 断面風速分布(微気流あり)

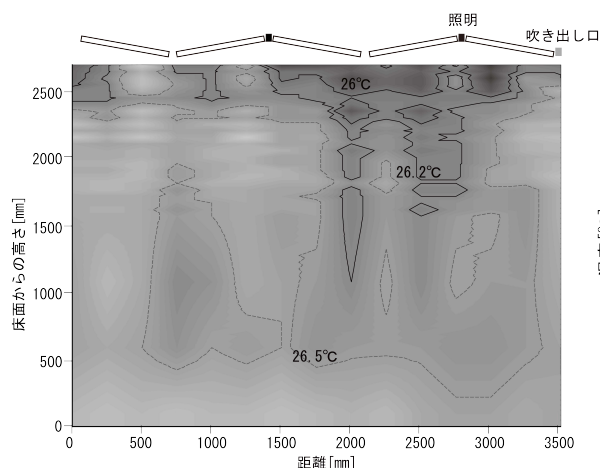


図 15 断面温度分布(微気流なし)

傾向の差が小さいため、放射空調の特徴である上下温度分布の均一性を執務者が感じていること、気流による局所的な冷却感が無いことが確認できる。また、全身温冷感に関して、暑い側の申告が 19%、寒い側の申告が 35%であったため、27°C 設定でも十分に涼しいと感じることのできる環境であることがわかる。図 18 に男女別全身温冷感申告と着衣量を示す。着衣量は ISO9920⁷⁾を参考に算出を行った。申告平均値は女性が-0.39、男性は+0.24 であり、女性の申告結果は着衣量との相関性があるが、男性は個人差が大きいことが明らかである。

快適度、受容度、満足度の調査は既往研究⁹⁾を参考に-0 と+0 の途切れた連続尺度を用いた。プラス側の回答が快適率、受容率、満足率とすると、各々74%、83%、74%となった。満足側の回答が得られた理由を図 19 に示す。執務者 1 人から回答が 2 つ以上得られた場合はどちらも数に含んだ。結果、放射空調の特徴が 78%を占めたが適切な気流の付加も満足感を与える要因となることがわかった。

図 20 に気流快適度と執務空間快適度の相関図を示す。図より気流の快適度は執務空間の評価に相関することがわかる。また、気流感は「感じる」が 3 名「やや感じる」が 22 名「どちらかといえば感じる」が 17 名「感じない」が 39 名であった。感じる側の回答は 51.9%であり、木村ら⁸⁾と同様の傾向がみられた。図 21、図 22 に感じる側に回答した人に調査した、気流感別の気流の強さと気流温度に関する結果を示す。気流強さ±0.5 以内回答は 63%、気流温度±0.5 以内回答は 78%を占めたため、室温と同程度の温度で 0.1~0.18m/s の変動域をもつ微気流は温度・風速共に適切であることが示された。

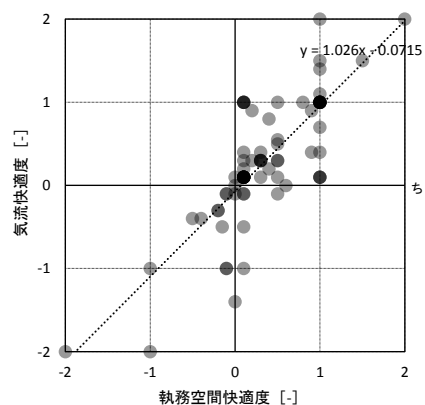


図 20 気流と快適性の相関

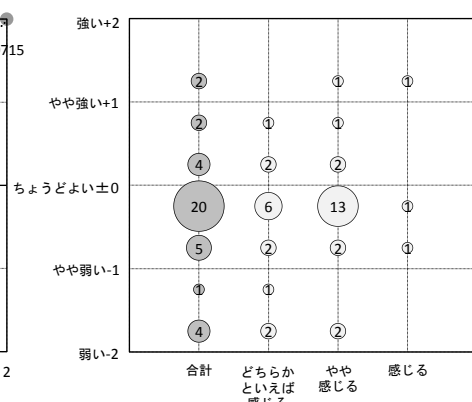


図 21 気流の強さと気流感の相関

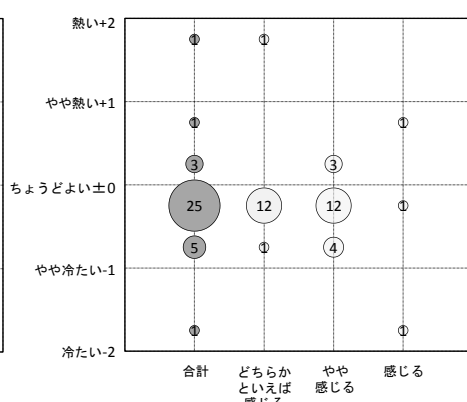


図 22 気流温度と気流感の相関

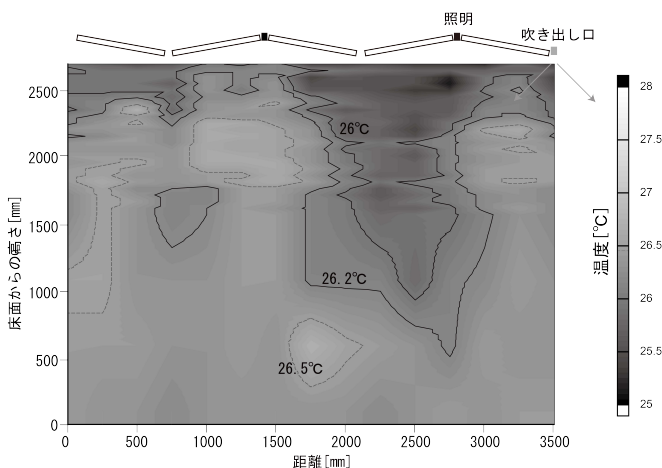


図 16 断面温度分布(微気流あり)

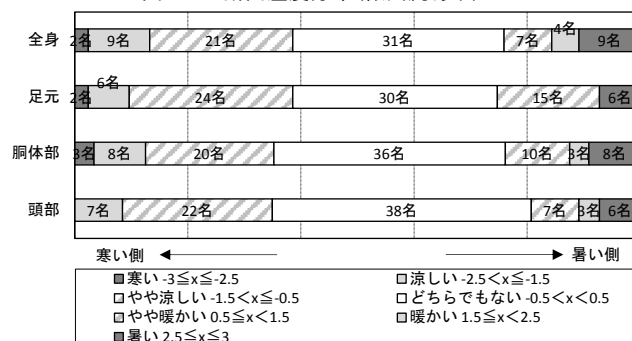


図 17 部位別温冷感

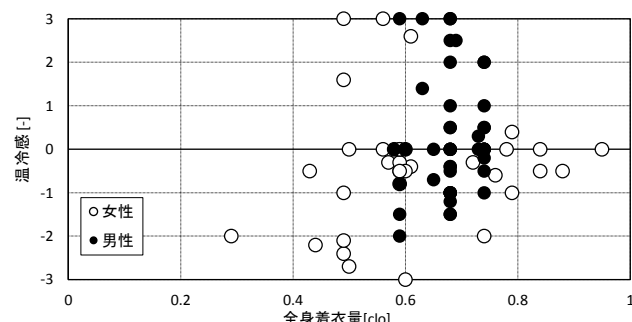


図 18 着衣量と温冷感

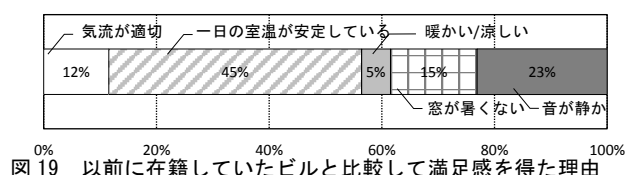


図 19 以前に在籍していたビルと比較して満足感を得た理由

4. 4 パネル単体性能評価

表 6 にパネル 1 枚あたりの詳細を示す。パネル室内側は塗料が塗られ、放射率 79.4%である。ただし面積は正射投影して算出した。図 23 に天井側と室内側の放射・対流熱伝達量を示す。この時、天井側平均温度は配管が 19.2℃、ヒートシンクが 20.2℃、パネルが 20.6℃であり、室内側は低温部が 20.5℃、高温部が 20.7℃であった。熱量は天井側が 35.6W/m²、室内側が 77.3 W/m²であり、放射 45%，対流 55%となった。図 24 にパネル表面温度と各熱流量の相関図を示す。立ち上げ後に流量が減ると各表面温度が上がり、各成分が同様の比率で減衰を起こすことが確認できた。

4. 5 微気流による快適範囲の拡大

2014 年に行ったモックアップを使用した被験者実験結果に基づき、既報³⁾では微気流による快適範囲の拡大を示唆している。本報では実験時の設定温湿度ではなく、実験時の温湿度測定値を使用し、快適範囲を検討する。表 7 にアンケート人数とアンケートを行った 25 分間の温熱環境平均値を示す。実験は図 25 のスケジュールにて行った。熱的緩衝空間である室温 30℃の前室を介したのち、放射空調室にて 3 パターンの風速条件で申告を行った。本報では、入居前検証結果より、中風速の 0.17m/s の実験結果にて検討を行う。

結果を図 26 に示す。気流を感じた人のうち、快適側の申告人数が 75%以上の範囲に色付けを行った。気流を付加することで温湿度が高い側にも快適範囲が広がり、作用温度が概ね 28℃ までは快適範囲となることを確認した。

図 27 に入居前検証の 10 時から 17 時の室内空気状態をプロットした結果を示す。ASHRAE が定める快適範囲⁹⁾は 26℃ 設定でのみ満たすものの、微気流を付加することで、27℃ 設定でも執務者の快適性は保持されることが示唆できる結果となった。

5 シミュレーションによる省エネルギー効果検証

5. 1 入力条件

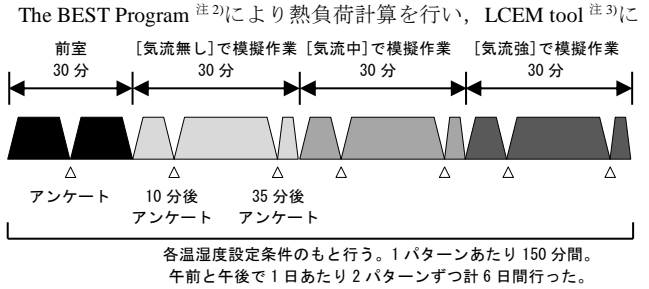


図 25 被験者実験スケジュール

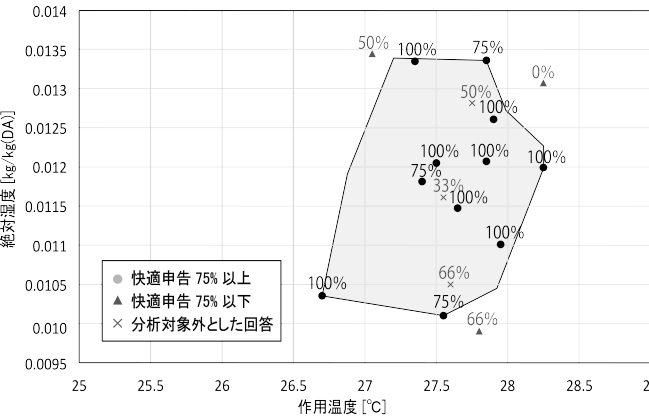


図 26 微気流による快適範囲の緩和

表 6 パネル詳細情報

	部位名	面積	面積比率	放射率
天井側	配管	0.212m ²	15.2%	85.6%
	ヒートシンク	0.443m ²	31.8%	83.0%
	パネル	0.739m ²	53.0%	42.5%
室内側	パネル低温部	0.634m ²	45.5%	79.4%
	パネル高温部	0.076m ²	54.5%	

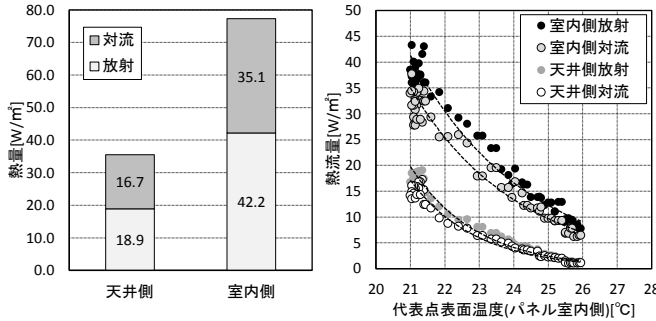


図 23 放射・対流成分

図 24 パネル表面温度と熱量

表 7 被験者実実験条件

中気流 (0.17m/s)					
温度 [℃]	作用温度 [℃]	絶対湿度 [kg/kg(DA)]	男性 [人]	女性 [人]	快適度 [%]
26.9	26.7	0.010356	3	1	100
27	27.05	0.013433	3	2	50
28.2	27.35	0.013348	2	3	100
27.5	27.4	0.011813	5	1	100
27.6	27.5	0.01205	3	3	75
28.1	27.55	0.010102	2	3	33.3
28.1		0.011161	2	3	66.7
27.8	27.6	0.010498	3	1	100
27.9	27.65	0.011473	6	0	50
27.3	27.75	0.012813	3	2	66.7
27.9	27.8	0.00989	3	2	100
28	27.85	0.012072	5	1	75
28		0.01336	5	1	100
28	27.9	0.012607	6	0	100
28	27.95	0.011009	5	0	100
28.4	28.25	0.011992	1	4	100
28.4		0.013059	1	4	0

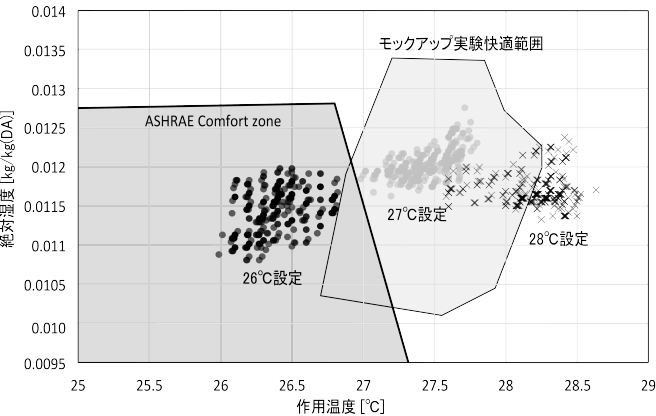


図 27 快適範囲と設定温度別室内温熱環境

てエネルギー消費量の算出を行った。建物モデルを図 28 に示す。Y ビルを参考に大規模オフィスビルを想定した。空調設定条件を表に示す。計算対象は夏季冷房運転を行う 6 月から 9 月、空調運転時間は 8 時から予冷運転を行い 9 時から 17 時まで運転とした。従来空調の各機器オブジェクトはツールの既存オブジェクトを使用した。放射パネルは既報³⁾の単体パネル能力式より、室顕熱負荷、冷水往温度、基準温度から流量を算出する式(4)を使用し、冷水往還温度差は 3K 一定とした。

$$Q = \beta \cdot e^{\left(\frac{1}{2.3206} \frac{q_m \cdot 2n_s}{K(T_a - T_i)} - 0.7826\right)}$$
 (4)

プレート式熱交換器は式(5)と式(6)を用い、対数平均温度差法に習って収束計算により一次側冷水還温度を算出する。ただし、総括伝熱係数は設計値を使用し、流量により変化するモデルとした。

$$q = Q C_p \Delta t$$
 (5)

$$q = a U \Delta t_m$$
 (6)

ヒートポンプ内蔵デシカント空調機は外気処理熱量と定格熱量から算出される COP より消費電力とファン動力を算出した。

5. 2 結果

結果を図 29 に示す。一般水式放射空調と比較して微気流併用型放射空調は微気流ファンにより空気搬送動力が増加するが、設定温湿度緩和によるデシカント空調のエネルギー消費量削減効果から、7.4%の省エネルギーとなる。また、AHU を用いた従来空調と比較して 39.4%の省エネルギーとなることが示唆された。

6. 結論

微気流併用型放射空調を行うオフィスの夏季冷房時を対象に、温熱環境実測、執務者アンケート調査及びシミュレーションによるエネルギー消費量の試算を行った結果、以下の知見が得られた。

I) 快適性の向上

- i : 運用時の居住域上下温度差は約 0.1K。形態係数 28% を占める天井放射パネルの影響で、MRT は室温より 1.1K 低く、冷却感が得られる執務空間が形成される。また、MRT の四分位範囲は 0.35K であり、パネルの冷水発停に関わらず体感室温は安定する。
- ii : 風速は「微気流なし」で約 0.1m/s 程度で概ね一定、「微気流あり」で 0.1~0.18m/s の間で変動微風が発生する。天井放射空調に微気流を併用させることで天井付近に滞留した冷氣の下降を促進し室内をより冷却する効果がある。
- iii : 気流快適度と執務空間快適度には相関関係がみられる。室温同等の気流温度で吹き出す微気流は風速・風温共に適正であるという結果がアンケート調査から得られた。
- iv : 上記実測結果並びに、モックアップ被験者実験に基づく微気流による快適範囲拡大の考察、快適率 74%である執務者アンケート調査結果から、放射空調に微気流を併用することで、設定温度を 27°C に緩和しても快適性が向上することが明らかとなった。

II) 省エネルギー効果

- i : 26°C 設定で運用を行う従来空調方式と比較して約 40%省エネルギーであることが示唆された。
- ii : 微気流ファンによる動力増分は、設定温湿度緩和効果によるヒートポンプデシカント空調機の消費電力削減値の範囲内であるため、一般水式空調と比較しても本システムはさらに省エネルギー運用を行うことが可能であることが示唆された。

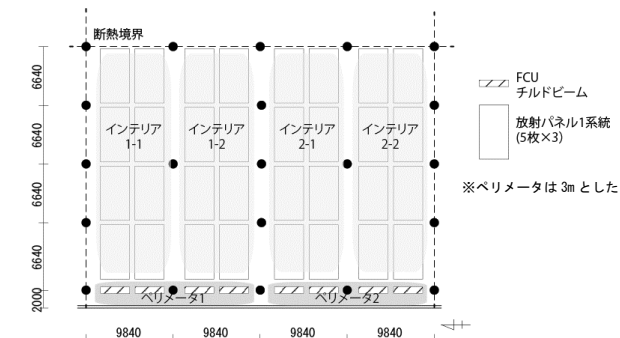


図 28 建物モデル(基準階平面図)

表 8 空調設定条件

	空調機器と台数(5フロア)	
	従来空調	放射空調
熱源	EHP チラー: 4 台,冷房 118kW, 3 連結, 送水温度 7°C	EHP チラー: 4 台,冷房 118kW, 3 連結, 送水温度°C
水搬送	一次ポンプ: 4 台,1015L/min 二次ポンプ: 3 台,1130L/min	一次ポンプ: 4 台,1015L/min 二次ポンプ: 3 台,1130L/min 三次ポンプ: 2 台,1233L/min
二次側	AHU: 10 台,8000m³/h, 給気温度 15°C FCU: 40 台, ユニットサイズ 300	放射パネル: 0.46 枚/m² 送水温度 17°C プレート式熱交換器: 2 台 HP 内蔵デシカント空調機: 2 台,11300m³/h チルドビーム: 40 台

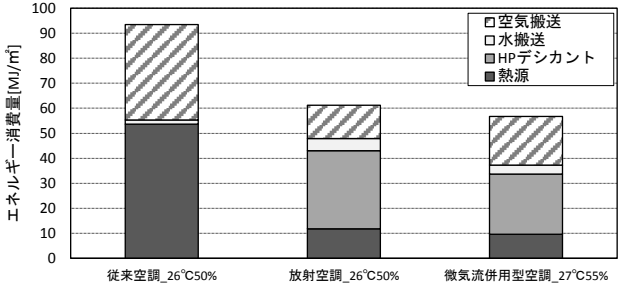


図 29 基準階単位面積当たりのエネルギー消費量算出結果

【謝辞】
本研究を行うに当たり、実測機器の貸与並びに御指導してくださった株式会社デンソーの松井様、アンケート調査及び実測の立ち入り等多大なるご協力を頂いた YKK 株式会社、YKK 不動産株式会社、YKK AP 株式会社、並びに関係者の皆様に深く感謝いたします。

【参考文献】
1) 羽田ら: 夏季室温緩和と設定オフィスにおける温熱環境実測および執務者アンケート調査による知的生産性に関する評価, 日本建築学会環境系論文集, 第 74 巻, 第 637 号, 389-396, 2009 年 3 月
2) 出口ら: 周期的変動気流に基づく空調とその快適性に関する研究(その 1~その 2), 日本建築学会関東支部研究報告集, 第 64 巻, 157-164, 1994 年 2 月
3) 水出ら: 微気流を併用した放射冷暖房を行うオフィスの温熱環境に関する実験研究(第 1 報~第 5 報), 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, 2014 年 9 月, 2015 年 9 月
4) 本郷ら: 微気流を併用した放射空調を行う都市型環境建築の性能検証(第 1 報~第 4 報), 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, 2016 年 9 月
5) 羽田ら: 夏季に室温を高めに設定したオフィスにおける知的生産性・裁量手法の導入による温熱満足度の向上と作業効率および疲労への影響, 日本建築学会環境系論文集 第 74 巻 第 646 号, 1329-1339, 2009 年 12 月
6) ISO7730 Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria
7) ISO9920 Ergonomics of the thermal environment — Estimation of thermal insulation and water vapour resistance of a clothing ensemble
8) 木村ら: 冷房空間の室内気流が体感に及ぼす影響に関する研究(その 1~その 2), 日本建築学会学術講演梗概集, 1987 年 8 月
9) ASHRAE Standard 55-2013 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy
注 1) SPCONV ver0.7, 永田明寛氏
注 2) The BEST Program 専門版 ver1602, IBEC
注 3) LCEM ツール ver3.10, 国土交通省

【記号】

q_1	: 通常熱流センサの放熱量[W/m²]	β	: $\beta = KA/(2C_p\rho)$
q_2	: アルミ蒸着センサの放熱量[W/m²]	A	: パネル 1 枚の面積[m²]
α_1	: 通常熱流センサの放射率[-]	C_p	: 水の比熱[J/(kg・K)]
α_2	: アルミ蒸着センサの放射率[-]	ρ	: 水の密度[kg/m³]
α_p	: 部材 p の放射率[-]	T_a	: 室温[°C]
q_{pr}	: 部材 p の対流熱伝達量[W/m²]	T_i	: 冷水往温度[°C]
q_{pe}	: 部材 p の放射熱伝達量[W/m²]	Δt	: 二次側往還温度差[K]
K	: 放射パネルの熱還流率[W/(m²K)]	a	: 伝熱面積[m²]
q_m	: 平均パネル能力[W/m²]	U	: 総括熱伝達係数[W/m²]
n_s	: パネル連結枚数[枚]	Δt_m	: 対数平均温度差[K]

1 章 序

1 序

1.1 はじめに

日本の年間エネルギー消費量のうち約 2 割は業務部門が占めており、そのうち冷暖房・照明・動力による消費は 7 割を超えることから、持続可能な社会を推進していくうえで空調設備の省エネルギー化は重要視されている。社会的な施策の一つとして環境省ではクールビズを提唱し、空調設定温度を 28℃に緩和することを推進している。しかし、従来の空調方式で 28℃に設定する場合、温熱環境不満足者率の増加や、作業効率の低下に関する報告があるため、着衣の軽装化と同時に、放射や気流により室内環境を向上させることは極めて重要である。このような背景から執務者の快適性と省エネルギー性を両立する技術として、近年では放射空調が注目されている。放射空調は冷却・加熱パネルの熱放射により室内温熱環境を調和する空調方式であり、パネルの冷却・加熱方式には水媒体と空気媒体がある。家具や建材も同時に室温程度に冷却・加熱することで、従来の対流式空調と比較してドラフト感や温度分布が小さい空間を形成することができ、室内を低い平均放射温度 (MRT) で一定に保つことが可能である。また、水式放射空調は、空気との熱交換必要がないことから、搬送動力の低減や熱媒温度の緩和といった省エネルギー効果も期待される。一方で気流による冷却効果や変動風の快適性が明らかであることから、近年、放射空調に気流を付加する事例に関する研究報告も増加している。対流併用型放射空調による更なる快適性の向上が期待できるものの、いまだ知見は不足している。

以上の背景を踏まえて本研究は、水式天井放射空調に天井から吹き出す微気流を併用した微流併用型放射空調を対象として、空調方式による快適性向上と省エネルギー効果の両立を明らかにすることを目的とする。この空調は潜顕熱分離型空調であり、顕熱負荷を水式放射パネル、潜熱負荷をデシカント空調により除去する。放射パネルは天井側も断熱されておらず、冷やされた天井側の空気を居住域に微気流として吹き出す。この空調方式が採用されたオフィスビルを対象に実測を行うことで、対流併用型放射空調の新たな可能性として設計された微気流併用型放射空調の有用性を検討する。

1.2 従来空調による 28°C 設定オフィス

従来型の放射空調にてクールビズ空調を行ことは既往研究にて報告されている。

- ・ 大熊ら：28°C 空調を行うオフィスにおいてアンケート調査を行ったところ、「許容できる」は 34%であることをして報告している。また、28°C 空調で熱的快適性を保つためには、更なる着衣量の減少に加え、MRT や湿度を低く保つ工夫をし、ある程度の気流を感じる環境にする必要があると報告し、気流の付加の重要性を指摘している。
- ・ 羽田ら：作用温度 28.5°C の室内環境においては執務上支障とならない範囲で可能な着衣の軽装化に加え、気流などによる温熱環境の調節が必要であると考えている。
- ・ 羽田ら：夏季室温緩和設定オフィスにおける執務者アンケート結果から、対象オフィスでは 7 月期および 8 月期は出勤時、退勤時ともに温熱環境に関する不満足者率が 70%を上回っていたことを報告している。温熱環境に関する満足度が高いと主観作業能力が高く、疲労度が低いという関係が認められた。気流速度の増加や着衣の軽装化、環境選択性の提供などにより、執務者の温熱環境に関する評価の向上を図ることで、夏季室温緩和設定オフィスにおいても作業効率の低下を防ぐことができる可能性がある。

1.3 気流による冷却効果

気流感と快適性に関する研究に関して以下のような方向をされている。

- ・ 出口ら：体感上優位な要因は室温であり、室温 23°C では多くが定常風を好み、25°C ではどちらとも言えず、27°C になると変動風による空調時より 2°C 程度高い室温に設定した場合、多少の熱ストレスを在室者に与えるものと考えられるが、その上で変動気流を作用させれば、気流変動による不快さを与えないで多くの人間に対し熱ストレスを緩和し快適な状況を相対的に創り出すことは可能であると考えられると報告している。
- ・ 木村ら：平均風速 0.15m/s で被験者の 50%で気流を感じ、風速 0.4m/s のときに被験者の 10%が不快を示したと報告している。また、変動気流は同じ平均風速でも定常気流より冷却力をもつとしている。

1.4 放射空調の遍歴と対流併用型放射空調

放射空調に関する空気調和・衛生工学会大会における発表梗概数を見ると、2012 年 13 報、2013 年 16 報、2014 年 17 報、2015 年 22 報、2016 年 30 報であり、放射空調は近年注目されている空調方式の一つである。放射暖房から始まり、水式や空気式の放射冷房が使用されるようになり、更なる快適性を目指して対流併用型放射空調の開発が行われるようになってきた。2015 年と 2016 年に空気調和・衛生工学会にて発表された放射空調方式を表 1.1 に示す。表に示すとおり、自然換気の併用や、多気孔パネルを用いた空気式放射空調、タスク空調との併用事例など、対流併用型放射空調の快適性を更に向上させる効果は着目されつつある。

表 1.1 2015 年、2016 年に発表された放射空調の空調方式

発表年度	発表者	発表内容	発表場所	発表形式	発表種別
2015 F-1	オフィス	次世代テナントオフィスビルの設計および運用における検証	その1 建築物および次世代システムの概要	水放射と空気放射、ブラントパネルのモジュール天井・天井放射空調・全館の換気・放射空調・ヒートポンプ放射空調・タスク空調(スマートインフィニティ)天井放射空調・小型天井リフレクト空調・アクティブパネル天井→実験フロア・暖房パネルの設置を断熱せず、夜間断熱効果と断熱放射空調を併用するハイブリッドシステム	大手門タワー・3Xビル
2015 F-2	オフィス	次世代テナントオフィスビルの設計および運用における検証	その2 放射空調のタスクランニングシステム運用に係る開発の概要	天井放射・パネル空調(様々な種類のPCS(R))	大手門タワー・3Xビル
2015 F-3	オフィス	次世代テナントオフィスビルの設計および運用における検証	その3 接続(パネル)空調の効果	天井放射・パネル空調(接続型PCS(R))	大手門タワー・3Xビル
2015 F-4	オフィス	次世代テナントオフィスビルの設計および運用における検証	その4 対流式(パネル)空調の効果	天井放射・パネル空調(対流型PCS(R))	大手門タワー・3Xビル
2015 F-5	オフィス	次世代テナントオフィスビルの設計および運用における検証	その5 放射式(パネル)空調の効果	天井放射・パネル空調(放射型PCS(R))	大手門タワー・3Xビル
2015 F-6	オフィス	オフィスにおける放射天井(パネル)を用いた空調システムに関する研究	その1 定常・非定常条件下での基本性能の検証	既存の床置き・天井放射のみによる外気導入+放射(パネル)天井(パネル)天井	
2015 F-7	オフィス	オフィスにおける放射天井(パネル)を用いた空調システムに関する研究	その2 非定常条件下での基本性能の検証	既存の床置き・天井放射のみによる外気導入+放射(パネル)天井(パネル)天井	
2015 F-8	オフィス	パッシブビルドビームを用いた天井内気流放射空調の基礎検討	(第2 報) 高気圧モデルにおける冷房実験	パッシブビルドビームと金網(スチール)の天井(パッシブビルドビームを組み合わせた天井)内気流放射空調方式	
2015 F-9	オフィス	パッシブビルドビームを用いた天井内気流放射空調の基礎検討	(第3 報) CFD を用いた圧力損失特性と天井(パネル)実用性能予測手法の検討		
2015 F-10	-	放射対流併用空調システムに関する研究	(その5) 水・空気併用型放射空調の過熱環境と快適性に関する実験結果	水式空気併用、放射対流併用空調	
2015 F-11	オフィス	空調用温水のタスク利用による放射式空調に関する研究	(第2 報) 放射空調を施した事務所ビルの室内環境シミュレーション	中温冷水利用	香川県高松市に計画された
2015 F-12	住宅	実験室を用いた放射対流併用空調の性能評価(第2 報)	市販のHP および放射パネル(パネル)によるシステム	水式放射空調+デシカント空調+自然換気、自然換気と放射空調を併用する	
2015 F-13	病院	放射対流併用空調の性能評価(第2 報)	(第4 報) 実験室実験による自然換気と環境制御の効果検証	水式放射空調+条件によって気流を付与したり	
2015 F-14	-	放射対流併用空調における天井放射パネル性能の検証	(その2) 夏期・冬期の検証	水式放射空調(アルミバンディングメタル)にのみ出し、対流効果を付与できなかった。暖房式温水循環、地中	
2015 F-15	-	放射対流併用可能な水式天井放射空調の性能検証及び在来空調との比較	(第5 報) 快適性と省エネルギーを両立した環境制御の検証	水式放射空調+デシカント空調+自然換気、自然換気と放射空調を併用する	
2015 F-16	オフィス	放射対流併用可能な水式天井放射空調の性能検証及び在来空調との比較	(第6 報) 実験室実験による自然換気と環境制御の効果検証	水式放射空調+デシカント空調+自然換気、自然換気と放射空調を併用する	
2015 F-17	住宅	放射対流併用可能な水式天井放射空調の性能検証及び在来空調との比較	(第7 報) 実験室実験による自然換気と環境制御の効果検証	水式放射空調+デシカント空調+自然換気、自然換気と放射空調を併用する	
2015 F-18	住宅	放射対流併用可能な水式天井放射空調の性能検証及び在来空調との比較	(第8 報) 実験室実験による自然換気と環境制御の効果検証	水式放射空調+デシカント空調+自然換気、自然換気と放射空調を併用する	
2015 F-19	学校	放射対流併用可能な水式天井放射空調の性能検証及び在来空調との比較	(第9 報) 実験室実験による自然換気と環境制御の効果検証	水式放射空調+デシカント空調+自然換気、自然換気と放射空調を併用する	
2015 F-20	学校	放射対流併用可能な水式天井放射空調の性能検証及び在来空調との比較	(第10 報) 実験室実験による自然換気と環境制御の効果検証	水式放射空調+デシカント空調+自然換気、自然換気と放射空調を併用する	
2015 F-21	学校	放射対流併用可能な水式天井放射空調の性能検証及び在来空調との比較	(第11 報) 実験室実験による自然換気と環境制御の効果検証	水式放射空調+デシカント空調+自然換気、自然換気と放射空調を併用する	
2015 F-22	学校(附属)	放射対流併用可能な水式天井放射空調の性能検証及び在来空調との比較	(第12 報) 実験室実験による自然換気と環境制御の効果検証	水式放射空調+デシカント空調+自然換気、自然換気と放射空調を併用する	
2016 J-23	-	放射対流併用可能な水式天井放射空調の性能検証及び在来空調との比較	(第13 報) 実験室実験による自然換気と環境制御の効果検証	水式放射空調+デシカント空調+自然換気、自然換気と放射空調を併用する	
2016 J-24	-	放射対流併用可能な水式天井放射空調の性能検証及び在来空調との比較	(第14 報) 実験室実験による自然換気と環境制御の効果検証	水式放射空調+デシカント空調+自然換気、自然換気と放射空調を併用する	
2016 J-25	-	放射対流併用可能な水式天井放射空調の性能検証及び在来空調との比較	(第15 報) 実験室実験による自然換気と環境制御の効果検証	水式放射空調+デシカント空調+自然換気、自然換気と放射空調を併用する	
2016 J-26	住宅	放射対流併用可能な水式天井放射空調の性能検証及び在来空調との比較	(第16 報) 実験室実験による自然換気と環境制御の効果検証	水式放射空調+デシカント空調+自然換気、自然換気と放射空調を併用する	
2016 J-27	-	放射対流併用可能な水式天井放射空調の性能検証及び在来空調との比較	(第17 報) 実験室実験による自然換気と環境制御の効果検証	水式放射空調+デシカント空調+自然換気、自然換気と放射空調を併用する	
2016 J-28	-	放射対流併用可能な水式天井放射空調の性能検証及び在来空調との比較	(第18 報) 実験室実験による自然換気と環境制御の効果検証	水式放射空調+デシカント空調+自然換気、自然換気と放射空調を併用する	
2016 J-29	-	放射対流併用可能な水式天井放射空調の性能検証及び在来空調との比較	(第19 報) 実験室実験による自然換気と環境制御の効果検証	水式放射空調+デシカント空調+自然換気、自然換気と放射空調を併用する	
2016 J-30	オフィス	放射対流併用可能な水式天井放射空調の性能検証及び在来空調との比較	(第20 報) 実験室実験による自然換気と環境制御の効果検証	水式放射空調+デシカント空調+自然換気、自然換気と放射空調を併用する	
2016 J-31	オフィス	放射対流併用可能な水式天井放射空調の性能検証及び在来空調との比較	(第21 報) 実験室実験による自然換気と環境制御の効果検証	水式放射空調+デシカント空調+自然換気、自然換気と放射空調を併用する	
2016 J-32	病院	放射対流併用可能な水式天井放射空調の性能検証及び在来空調との比較	(第22 報) 実験室実験による自然換気と環境制御の効果検証	水式放射空調+デシカント空調+自然換気、自然換気と放射空調を併用する	
2016 J-33	病院	放射対流併用可能な水式天井放射空調の性能検証及び在来空調との比較	(第23 報) 実験室実験による自然換気と環境制御の効果検証	水式放射空調+デシカント空調+自然換気、自然換気と放射空調を併用する	
2016 J-34	病院	放射対流併用可能な水式天井放射空調の性能検証及び在来空調との比較	(第24 報) 実験室実験による自然換気と環境制御の効果検証	水式放射空調+デシカント空調+自然換気、自然換気と放射空調を併用する	
2016 J-35	病院	放射対流併用可能な水式天井放射空調の性能検証及び在来空調との比較	(第25 報) 実験室実験による自然換気と環境制御の効果検証	水式放射空調+デシカント空調+自然換気、自然換気と放射空調を併用する	
2016 J-36	オフィス	放射対流併用可能な水式天井放射空調の性能検証及び在来空調との比較	(第26 報) 実験室実験による自然換気と環境制御の効果検証	水式放射空調+デシカント空調+自然換気、自然換気と放射空調を併用する	
2016 J-37	オフィス	放射対流併用可能な水式天井放射空調の性能検証及び在来空調との比較	(第27 報) 実験室実験による自然換気と環境制御の効果検証	水式放射空調+デシカント空調+自然換気、自然換気と放射空調を併用する	
2016 J-38	オフィス	放射対流併用可能な水式天井放射空調の性能検証及び在来空調との比較	(第28 報) 実験室実験による自然換気と環境制御の効果検証	水式放射空調+デシカント空調+自然換気、自然換気と放射空調を併用する	
2016 J-39	オフィス	放射対流併用可能な水式天井放射空調の性能検証及び在来空調との比較	(第29 報) 実験室実験による自然換気と環境制御の効果検証	水式放射空調+デシカント空調+自然換気、自然換気と放射空調を併用する	
2016 J-40	オフィス	放射対流併用可能な水式天井放射空調の性能検証及び在来空調との比較	(第30 報) 実験室実験による自然換気と環境制御の効果検証	水式放射空調+デシカント空調+自然換気、自然換気と放射空調を併用する	
2016 J-41	病院	放射対流併用可能な水式天井放射空調の性能検証及び在来空調との比較	(第31 報) 実験室実験による自然換気と環境制御の効果検証	水式放射空調+デシカント空調+自然換気、自然換気と放射空調を併用する	
2016 J-42	オフィス	放射対流併用可能な水式天井放射空調の性能検証及び在来空調との比較	(第32 報) 実験室実験による自然換気と環境制御の効果検証	水式放射空調+デシカント空調+自然換気、自然換気と放射空調を併用する	
2016 J-43	-	放射対流併用可能な水式天井放射空調の性能検証及び在来空調との比較	(第33 報) 実験室実験による自然換気と環境制御の効果検証	水式放射空調+デシカント空調+自然換気、自然換気と放射空調を併用する	
2016 J-44	住宅	放射対流併用可能な水式天井放射空調の性能検証及び在来空調との比較	(第34 報) 実験室実験による自然換気と環境制御の効果検証	水式放射空調+デシカント空調+自然換気、自然換気と放射空調を併用する	
2016 J-45	住宅	放射対流併用可能な水式天井放射空調の性能検証及び在来空調との比較	(第35 報) 実験室実験による自然換気と環境制御の効果検証	水式放射空調+デシカント空調+自然換気、自然換気と放射空調を併用する	
2016 J-46	非住宅(商業)	放射対流併用可能な水式天井放射空調の性能検証及び在来空調との比較	(第36 報) 実験室実験による自然換気と環境制御の効果検証	水式放射空調+デシカント空調+自然換気、自然換気と放射空調を併用する	
2016 J-47	オフィス	放射対流併用可能な水式天井放射空調の性能検証及び在来空調との比較	(第37 報) 実験室実験による自然換気と環境制御の効果検証	水式放射空調+デシカント空調+自然換気、自然換気と放射空調を併用する	
2016 J-48	オフィス	放射対流併用可能な水式天井放射空調の性能検証及び在来空調との比較	(第38 報) 実験室実験による自然換気と環境制御の効果検証	水式放射空調+デシカント空調+自然換気、自然換気と放射空調を併用する	
2016 J-49	-	放射対流併用可能な水式天井放射空調の性能検証及び在来空調との比較	(第39 報) 実験室実験による自然換気と環境制御の効果検証	水式放射空調+デシカント空調+自然換気、自然換気と放射空調を併用する	
2016 J-50	オフィス	放射対流併用可能な水式天井放射空調の性能検証及び在来空調との比較	(第40 報) 実験室実験による自然換気と環境制御の効果検証	水式放射空調+デシカント空調+自然換気、自然換気と放射空調を併用する	
2016 J-51	オフィス	放射対流併用可能な水式天井放射空調の性能検証及び在来空調との比較	(第41 報) 実験室実験による自然換気と環境制御の効果検証	水式放射空調+デシカント空調+自然換気、自然換気と放射空調を併用する	
2016 J-52	オフィス	放射対流併用可能な水式天井放射空調の性能検証及び在来空調との比較	(第42 報) 実験室実験による自然換気と環境制御の効果検証	水式放射空調+デシカント空調+自然換気、自然換気と放射空調を併用する	

1.5 論文の構成

本論文は、本文 7 章と付録にて構成されている。各章概要は以下の通りである。

第 1 章「序」では、快適性と省エネルギー性を両立することの重要性から研究の背景を明らかにする。また、既往研究から従来空調による 28℃ 設定オフィスの申告結果を明らかにする。また、気流による快適性を報告する文献から、空調方式が気流併用型であることの有用性を示す。近年需要が強まっている放射空調の遍歴と対流併用型放射空調の出現、事例を取り上げるとともに研究の目的と本論文の構成を示す

第 2 章「微気流併用型放射空調を行うオフィス」では、実測対象としたオフィスである Y ビルの建物概要と空調システム概要を示す。

第 3 章「検証計画と分析手法」では、これまで行われてきた Y ビルにおける検証計画の概要を示し、実際に行った実測の設置点や使用機材、測定方法の詳細や既往研究を参考にして行った分析手法を示す。

第 4 章「夏季冷房検証結果」では、2015 年入居前、2016 年運用時において夏季に行った冷房検証結果を示す。検証は温熱環境実測、アンケート調査からなる。この章では微気流併用型放射空調の設定温湿度緩和効果や微気流による冷却効果並びに快適性向上効果に関する検討を行う。また、2014 年に行われたモックアップ被験者実験結果の再度分析結果から快適範囲の拡大効果についても分析を行う。

第 5 章「冬季暖房検証結果」では 2015 年における冬季暖房 1 年目検証結果を示す。検証は夏季と同様に温熱環境実測、アンケート調査からなる、この章では一般的な天井放射暖房として運用するこの空調システムの冬季温熱環境に関して分析を行う。

第 6 章「シミュレーションによる省エネルギー効果検証」ではエネルギー消費量削減効果を、ビルエネルギー管理システムを用いた運用実績とシミュレーションにより示す。シミュレーションでは The BEST Program を用いて算出した熱負荷を LCEM tool におけるシステムシミュレーションの入力条件とすることでエネルギー消費量の算出を行い。一般大規模オフィスビルを想定した仮想のモデルを対象として行った。従来式空調と水式放射空調、微気流併用型水式放射空調の夏季冷房時のエネルギー消費量を比較することで、本システムの省エネルギー効果を検討する。

第 7 章「総括」では本研究の結論を示す。

参考文献

1. 省エネルギー庁 HP
2. 夏季のオフィスにおける 28°C 口調の熱的快適性に関する研究 大熊涼子 石野久彌 中山哲士 日本建築学会環境系論文集 第 618 号 31-36 2007 年 8 月
3. 夏季に室温を高めに設定したオフィスにおける知的生産性—採涼手法の導入による温熱満足度の向上と作業効率および疲労への影響— 羽田正沖 西原直枝 川口玄 田辺新一 日本建築学会環境系論文集 第 74 巻 第 646 号 1329-1337 2009 年 12 月
4. 夏季室温緩和設定オフィスにおける温熱環境実測および執務者アンケート調査による知的生産性に関する評価 羽田正沖 西原直枝 中村駿介 内田智志 田辺新一 日本建築学会環境系論文集 第 74 巻 第 637 号 389-396 2009 年 3 月
5. 個人制御による非等温タスク空調が熱的快適性・知的生産性に与える影響 秋元孝之 松田順平 西原直枝 田辺新一 日本建築学会環境系論文集 第 582 号 75-82 2004 年 8 月
6. 温熱環境と換気量が知的生産性に与える影響に関する被験者実験 羽田正興 西原直枝 田辺新一 日本建築学会環境系論文集 第 74 巻 第 638 号 507-515 2009 年 4 月
7. 節電対策が快適性・知的生産性・省エネルギー性に与える影響 東日本大震災後の節電環境課におけるオフィス実態調査に関する研究 岩橋優子 田辺新一 對馬聖菜 西原直枝 平岡雅哉 菰田英晴 田淵誠一 日本建築学会環境系論文集 第 79 巻 第 704 号, 901-908, 2014 年 10 月
8. 周期的変動気流に基づく空調とその快適性に関する研究 その 1 変動気流発生原理と実在オフィスにおける変動風速測定 出口清考 村上周三 加藤信介 森田洋 佐藤信考 小林仁三 五百井隆文 羽生太 日本建築学会関東支部研究報告書 1993 年度
9. 周期的変動気流に基づく空調とその快適性に関する研究 その 2 実在オフィスにおける体感実験 出口清考 村上周三 加藤信介 森田洋 佐藤信考 小林仁三 五百井隆文 羽生太 日本建築学会関東支部研究報告書 1993 年度
10. 冷房空間の室内気流が体感に及ぼす影響に関する研究 その 2 平均皮膚温度・快不快感申告・ドラフト・好まれる気流速・変動気流の体感影響 木村健一 田辺新一 原俊広 秋元孝之 秋山尚之 磐田利枝 田宮健司 近岡正一 日本建築学会学術講演梗概集(近畿)昭和 62 年 10 月
11. 夏季の通風・室内気流が体感に及ぼす影響に関する研究 その 2 定常気流に関する温冷感申告・平均皮膚温度・快不快感申告・気流を感じる人と不快と感じる人の割合 木村健一 田辺新一 原俊広 秋元孝之 秋山尚之 磐田利枝 田宮健司 近岡正一 日本建築学会学術講演梗概集(近畿)昭和 62 年 10 月

2 章 微気流併用型放射空調を行うオフィス

2 微気流併用型放射空調を行うオフィス

2.1 はじめに

2 章では実測対象とした微気流併用型放射空調を行うオフィスである Y ビルの詳細を示す。

2.1 は建物概要として、建築面積やファサード詳細を示す。2.2 は空調システム概要として、微気流併用型放射空調のコンセプト、運転モードスケジュール、詳細制御手法を示す。

2.2 建築概要

建物の外観写真を図 2.1 に示す。対象建物は東京都千代田区に建つ YKK80 ビルである。以下 Y ビルと記す。Y ビルは YKK グループである、YKK 株式会社、YKK 不動産株式会社、YKK AP 株式会社が入居するテナントオフィスビルである。建築概要を表に示す。敷地は秋葉原と神楽坂の境に位置し、真西に全面開口である。ファサードは大通りに面し、首都高速 1 号上野線が眼下に走る。



図2.1 建物外観写真

表2.1 建物概要

所在地	東京都千代田区
用途	事務所
建築面積	2,059m ²
延床面積	22,574m ²
基準階面積	1,960m ²
構造	SRC,CFT,免震
階数	地下 2, 地上 10 階
軒高	39.5m
階高	3.85m
天井高	2.8m

図 2.2 に西面ファサードの詳細を示す。Y 型断面のアルミ外部遮蔽ルーバー(図 2.3)、水平底、クライマーブラインド内蔵二重窓(図 2.4)により日射遮蔽が行われている。

クライマーブラインド内蔵二重窓は、屋上に設置された写真のような機器にて自動制御を行っている。

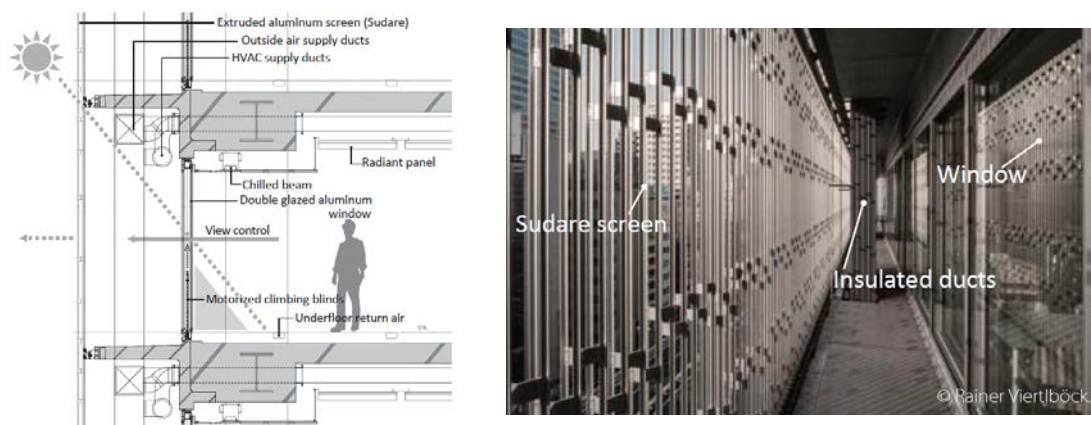


図2.2 西面ファサードシステム

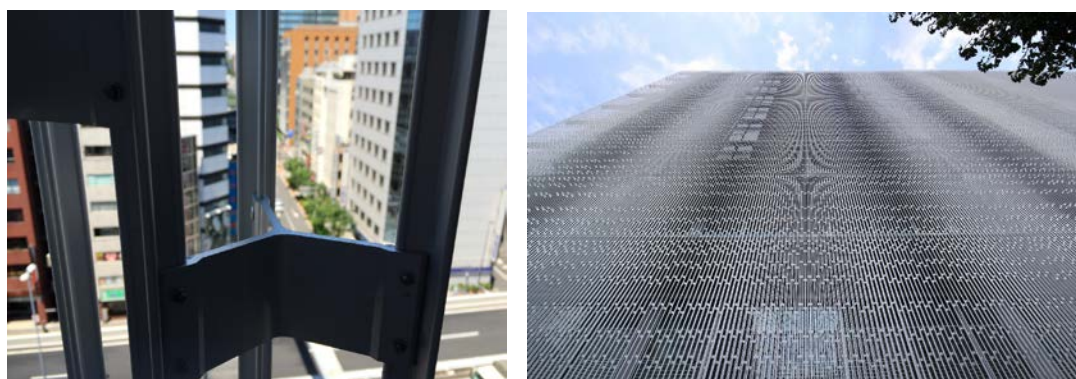


図2.3 Y 型断面アルミルーバー

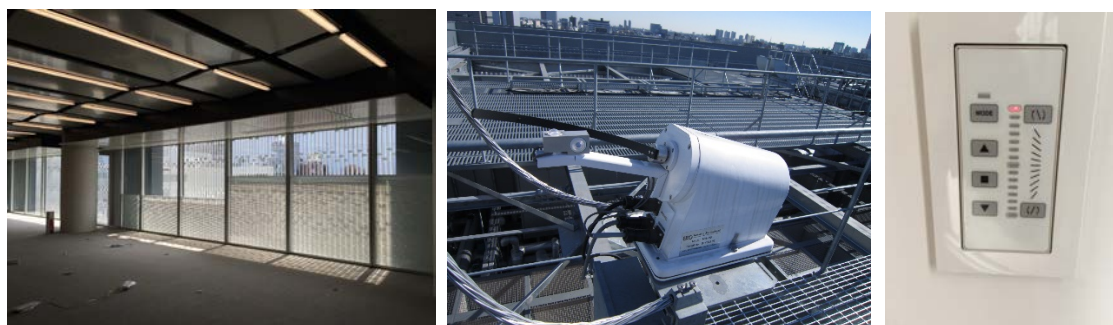


図2.4 クライマーブラインド内蔵二重窓

2.3 空調システム概要

2.3.1 室内コンセプト

執務空間の写真を図 2.2 に示す。微気流併用型放射空調システムの室内コンセプトを模式図により図 2.3 に示す。顕熱負荷を放射パネルにて、潜熱負荷をデシカント空調機にて処理する、一般的な天井水式放射空調に気流を付加した対流併用型放射空調である。「木陰のそよ風」をコンセプトに設計された微気流併用型放射空調の気流は「微気流」であり、温度、湿度、放射、気流の 4 要素を制御することによって快適性を追求した空調方式となっている。放射パネルは傾斜配置することにより天井に隙間をもたせ、居住域に自然対流による緩やかな空気循環を促す形状である。このパネルは天井内側も断熱しておらず、放射冷却とデシカント空調により温湿度調整された空気をファンにて居住域に微気流として吹き出す。ペリメータはチルドビームを採用し、放射パネルに使用中温冷水をコイルに用いている。



図2.5 執務空間写真

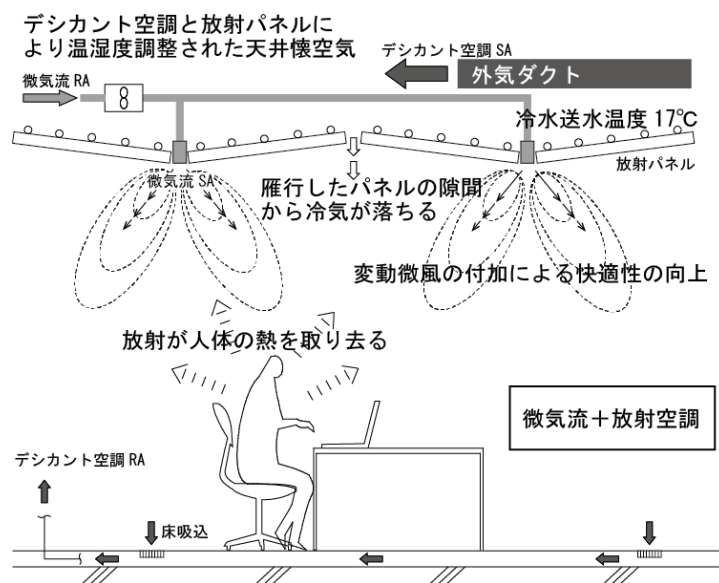


図2.6 放射空調概念図

2.3.2 運用モード

空調システムの各運転モードを表 2.2 に示す。夏、中間期、冬の各モード判定は中央監視より各階で行う。主に放射空調とデシカント空調にて負荷処理を行うが、中間期で外冷判定が有効であった時のみ、放射空調に外気冷房を併用する。外気冷房の運転条件は 2.3.3.5 参照とする。また微気流は 6 月から 9 月の 4 カ月間運転を行う。3 月から 11 月の外冷有効の夜間は外冷のみ行うことで、執務空間に蓄積された熱を外気で冷却し、冷房立ち上げ時の冷房負荷を軽減することで省エネルギー化を図る。

表2.2 運転モード

		1	2	3	4	5 ナイトページ	
運転モード		夏期モード	中間期モード		冬期モード	夏期・中間期 モード	
時期		6～9 月	3～5, 10～11 月		12～2 月	3～11 月 (外冷有効の 夜間, 早朝)	
概要		放射+微気流+ デシカント	外冷条件成立 放射+外冷	外冷条件不成立 放射+デシカント	放射+デシカ ント	外冷単独	
室内 条件	温度	27℃	27℃	27℃	22℃	23℃	
	湿度	55%RH	50%RH	50%RH	40%RH	50%RH	
	気流	微気流あり	微気流なし	微気流なし	微気流なし	微気流なし	
	放射	放射パネル あり	放射パネル あり	放射パネル あり	放射パネル あり	放射パネル なし	
	着衣量	クールビズ	-	-	-	-	
	代謝量	-	-	-	-	-	
運 転 順 位	放射空調（冷水/温水）		3	2	3	3	OFF
	微気流		4	OFF	OFF	OFF	OFF
	外気冷房		OFF	1	OFF	OFF	1
	HP デシ カント	本体	1	OFF	1	1	OFF
		プレアフタ-	2	OFF	2	2	OFF
		加湿	OFF	OFF	OFF	ON	OFF

2.3.3 詳細制御方法

採用している空調システムの系統図を示す。熱源は電気式ヒートポンプチラーとガスヒートポンプチラーである。異なるエネルギー源であるガス熱源と電気熱源を併用することで、バックアップを可能としている。3 連結である電気式ヒートポンプチラーは各チラーに一次ポンプが内蔵しているが、4 連結であるガス式ヒートポンプチラーは 4 連結の後に一次ポンプが設置されている。二次ポンプは冷専と温専の 2 台設置しており、3 連結ポンプである。ヘッダーを介して送水された熱源水は冷房と暖房で異なる経路をたどる。

冷房時は潜熱処理に流される水と顕熱処理に使用する水に分離される。潜熱処理はヒートポンプ式デシカント空調機にて行うため、熱源は個別で持っている。ヒートポンプチラーからくる熱源水は一部のみ使用している。顕熱処理に用いる冷水はプレート式熱交換器を用いて二次側の冷水と熱交換を行う。熱源水に冷却され、三次ポンプにて送水された二次側冷水は放射パネルとチルドビームに送水される。

暖房時も同様に潜熱処理に流される水と顕熱処理に使用する水に分離される。異なる点は顕熱処理に用いる温水は熱交換器を介さず熱源水がそのまま送水されることである。

表に各機器の能力表を示す。

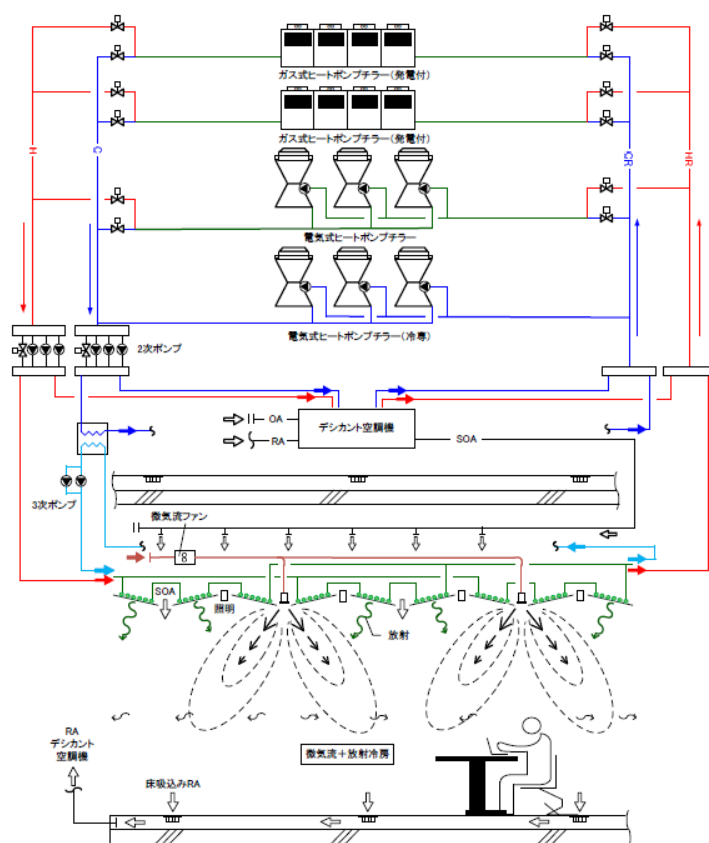


図2.7 空調システム系統図

2.3.3.1 熱源

熱源は上述のように、電気式ヒートポンプチラー(ASMR)とガスヒートポンプチラー(GHPC)を用いている。電気式ヒートポンプチラーの型式はインバータポンプ内蔵 高 COP タイプとなり、散水量は 13.6L/min である。1～3 は定格冷却・加熱能力ともに 118kW であり、4～6 は全て冷専であり定格冷却能力は同様に 118kW である。ガスヒートポンプチラーの型式は熱源供給型 GHP チラーであり、都市ガス 13A を用いる。1～8 すべて定格冷却能力 71kW、定格加熱能力 80kW である。この GHP チラーに付属する一次ポンプは片吸込渦巻きポンプであり、定格水量 880L/min である。熱源は全て屋上室外機置き場に設置され、一次ポンプは 10 階ポンプヘッダー室に設置される。

運転は中央監視にて「電気優先」と「ガス優先」の切り替えを可能としており、現在は電気優先にて行っている。熱源群発停指令により台数制御を行い、負荷側流量設定値と熱量設置値により各熱源機の増減を行っている。冷水温度設定値はウォーミングアップ時も通常時も 13°C である。一方で温水温度設定値はウォーミングアップ時に 40°C、通常時に 37.5°C としている。熱源運転順位を表に示す。

表2.3 熱源運転順位

	電機優先				ガス優先			
	夏・中間期	冬季-1	冬季-2	冬季-3	夏・中間期	冬季-1	冬季-2	冬季-3
GHPC-1-1～4	C2・3	C2・3	C2・3	C2orH2	C1・2	C1・2	C1・2	C1orH1
GHPC-2-1～4				H2orC2				H1orC1
ASMR-1-1	C1	H1	H1	H1	C3	H1	H1	H2
ASMR-1-2		C1				C1		
ASMR-1-3								
ASMR-1-4(冷専)								
ASMR-1-5(冷専)								
ASMR-1-6(冷専)								

※C：冷熱源運転順位、H：温熱源運転順位

2.3.3.2 二次ポンプ

二次ポンプは冷水二次ポンプ、温水二次ポンプを各 3 台ずつ設置している。どちらも片吸込渦巻きポンプであり、10 階のポンプヘッダー室に設置される。各能力は冷水が 1130L/min、温水が 980L/min となる。二次ポンプの台数制御は負荷流量より演算して発停が行われる。また、前後差圧が設定値通りとなるよう、インバータ出力（ポンプ回転数）及びバイパス弁の比例制御が行われる。

2.3.3.3 熱交換器と循環ポンプ（三次ポンプ）

3 系統に分離して制御を行っている。各系統と使用機器を表 2.3 に示す。通り芯番号は図 2.1 を参照とする。X2-X4 通りにおける熱交換機と循環ポンプ周辺の計測図を抜粋して図 2.1 に示す。ポンプは二次側送水温度制御、冷水結露防止制御、差圧制御、インターロック制御を行っている。

ポンプ通過後の送水温度(TEW2)が設定値となるよう、制御弁（温水系統 ME3V1、冷水系統 ME1V1）にて比例制御を行っている。また、一次側との温度差確保のため、熱源からの冷水・温水供給温度変化に追従して送水温度設定値補正を行っている。補正は以下のように行う。

冷水系統：冷水送水温度実行設定値＝冷水送水温度基本設定値＋冷水一次側基準温度(13°C)からの上昇温度

温水系統：温水送水温度実行設定値＝温水送水温度基本設定値－温水一次側基準温度(37.5°C)からの上昇温度

差圧制御は、冷水系統は冷水送水ポンプの前後差圧が設定値となるよう、インバータ出力及びバイパス弁(ME1V1-b)の PID 制御を行っている。温水系統は温水負荷側往還差圧が設定値となるよう、インバータ出力及びバイパス弁(ME1V1-c)の PID 制御を行っている。

各熱交換器の能力を表 2.4 に示す。

表2.4 ポンプと熱交換器の系統

送水ポンプ		熱交換器	受け持ち範囲・系統
冷	PC-4-1,2	HEXC-1	4～8F X2—X4 通り
温	PH-4-1,2	-	
冷	PC-5-1,2	HEXC-2	4～8F X2—X4 通り
温	PH-5-1,2	-	
冷	PC-6-1,2	HEXC-3	4～8F X2—X4 通り
温	PH-6-1,2	-	

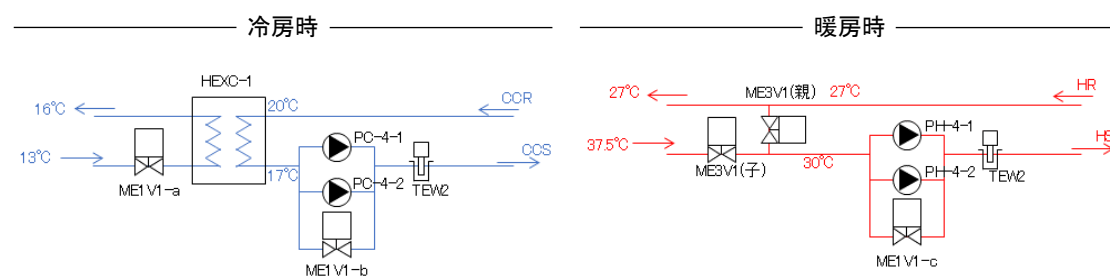


図2.8 熱交換器と循環ポンプ

冷房時、一次側冷水と二次側冷水の熱交換にはプレート式熱交換器が用いられる。熱交換にて10%、パネル上部にて20%のロスを見込んで能力採用値が決定した。表に各能力を示す。ただし、暖房時の温水は一次側熱源水が

熱交換器		HEXC-1	HEXC-2	HEXC-3
	熱交換器必要能力[kW]	201.5	105.0	140.0
	流量[L/min]	962.7	501.7	668.9
	温度差 Δt [K]	3		

2.3.3.4 放射空調とチルドビーム

放射パネルは図2.6のグループにて制御している。パネルへの通水は5枚連結で行われている。5枚連結を1系統とすると、2系統または3系統ごとに個別制御を行っている。図に示す四角は最小制御ゾーンとなる2系統または3系統を示す。斜線の入った四角はチルドビーム1台を示し、個別制御が行われる。丸に示す室内温度検出器にて温度制御を行う。また、8階のみパネルの表面温度、流量の測定もBEMSにて行っている。ただし、冷暖房は中央監視の指令または自動制御を行っている。自動制御は温度計測値の比較で冷/暖房を決定する。

[放射パネル廻り制御]

放射パネル廻りのみの制御は室内温度制御と床吸込み温度制御、インターロック制御を行っている。室内温度制御は図2.10の温度センサの室内温度が設定値となるよう、放射パネル出口側制御弁のPID制御を行っている。室内設定温度は図2.6に示す各ゾーンにて設定可能である。床吸込み制御は暖房ウォーミングアップ運転中のみ実施する運転方式であり、床吸込み温度が設定値となるよう、放射パネル出口側制御弁のPID制御を行っている。この制御は室内温度が上昇し、設定値に到達した時点でウォーミングアップ制御時間内であっても中止される。

[チルドビーム廻り制御]

チルドビーム廻りのみの制御は天井温度制御と温度設定補正制御を行っている。天井温度制御は図2.11のように窓と柱の間に取り付けられた温度センサが設定値となるようチルドビーム出口側制御弁のPID制御を行っている。

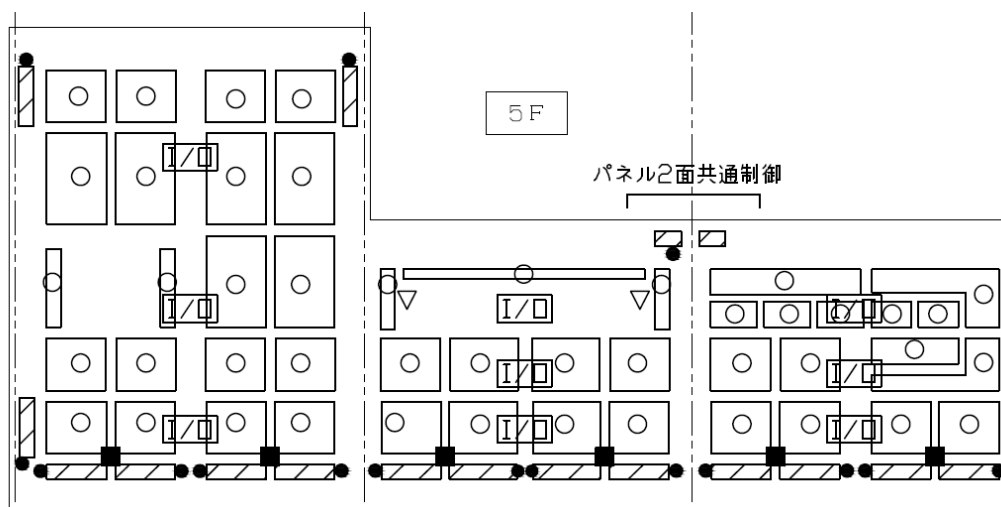


図2.9 パネル制御グループ



図2.10 室内温度センサ



図2.11 天井温度センサ

2.3.3.5 外気処理

外気処理は中央監視の運転モードにしたがってデシカント空調機と外調機にて行っている。外気冷房の運転条件を下記に示す。下記条件が全て満たされた中間期と、夏期・中間期の夜間のみ外気冷房が有効となり、それ以外はデシカント空調にて潜熱処理を行う。

- ・ 外気温度 < 室内温度
- ・ 外気エンタルピ < 室内エンタルピ
- ・ 外気温度 > 外気温度下限値 (14°C)
- ・ 外気露点温 < 外気露点温度上限値 (13°C DP)
- ・ 外気露点温度 > 外気露点温度下限値 (3°C DP)

Yビルではデシカント空調は4台、外調器は5台使用している。各機器の制御範囲を図2.12に、能力を表2.3に示す。

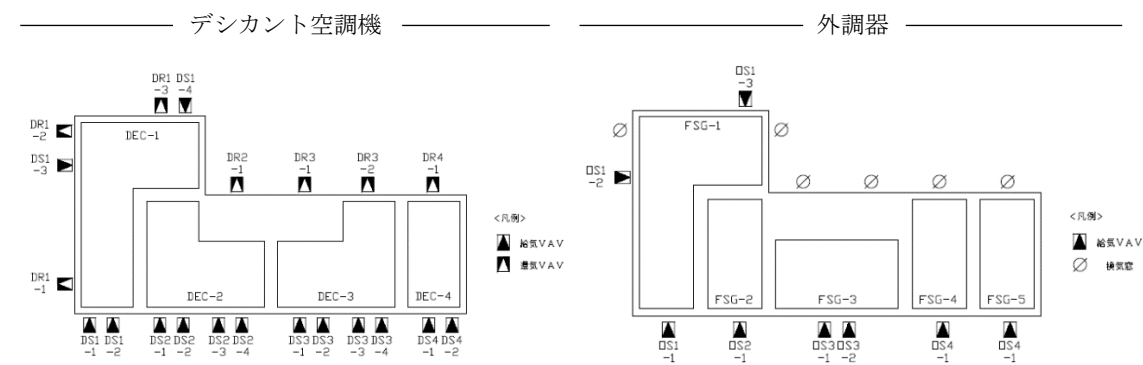


図2.12 基準階（4,5,7,8 階）機制御範囲

表2.5 機定格風量

デシカント空調機		外気冷房	
機器番号	定格風量	機器番号	定格風量
DEC-1	11300m ³ /h	FSG-1	39200
DEC-2	12470m ³ /h	FSG-2	22000
DEC-3	11680m ³ /h	FSG-3	30900
DEC-4	6190m ³ /h	FSG-4	21100
		FSG-5	20300

3 章 検証計画と実測手法

3 検証計画と実測手法

3.1 はじめに

第3章ではYビルにおける性能検証計画の詳細、実測手法と分析手法を取り上げる。

3.2では設計フェーズから運用フェーズまであり、建物のライフサイクルに寄り添いながらコミッショニングを行っている詳細を提示する。3.3では検証にて行った、測定手法と分析手法を提示する。測定手法は使用機材と測定点を示す。またインターバルや手動測定においては測定方法を示す。分析手法は温熱環境、サーマルマネキン、パネル単体性能、執務者アンケート調査について、参考にした既往研究を提示すると同時にどのように分析を行ったかを示す。また、パネル単体性能試験に関しては2015年、2016年に東洋熱工業の技術研究所にて行った、予備実測から導いた測定方法の詳細を、技術研究所にて行った予備実測内容を提示しながら示す。

3.2 Yビルにおける性能検証

微気流併用型放射空調を行う Y ビルでは設計時から性能検証が行われてきた。性能検証行程を表 3.1 に示す。検証は「省エネ・省資源化」と「室内環境」に大別でき、室内環境は「温熱環境検証」と「クライマープラインド検証」に分けられる。2011 年 11 月から設計がはじまり、設計フェーズではシミュレーションによりエネルギー消費量の試算や、BIM と CFD の統合シミュレーションにより温度分布や風速分布を把握した。2013 年 1 月より施工が開始された。施工時にはモックアップを使用した温熱環境実測と被験者実験により、微気流の風向やパネルの取り付け方法等を決定し、施工にフィードバックを行った。また、被験者実験から気流強さの決定や設定温湿度の決定を行うことで、運用への知見を蓄積した。2015 年 7 月に竣工し、執務者の使用が始まる前に模擬負荷を設置して設定温湿度を変更したパターンごとに温熱環境測定を行った。また、同時にクライマープラインドの夏季性能検証として、熱貫流率の測定やブラインド設定別に照度分布の測定を行った。執務者が入居して運用が始まり、「省エネ・省資源化」検証においては BEMS によりエネルギー消費量の実値を分析し、運用にフィードバックしていくことで更なる省エネルギー運用を目指している。また、「室内環境」検証については、各シーズンに温熱環境実測と執務者アンケート調査を行うことで、執務者の主観的評価も含んだ室内環境評価を行った。結果は設定温度等運用にフィードバックしている。クライマープラインドの検証は 2015 年 12 月より年間検証を行い、積分球を使用した実測や執務者アンケート調査を行うことでクライマープラインドの制御に関する閾値の変更や高さステップの分割数、スラット角制御方法の変更を行い、最適な運用を目指している。これらは施主と設計者・施工者・運用者にて毎月性能検証会議を行うことで実測・分析結果を運用にフィードバックさせることで、コミニュケーションを行っている。

表3.1 性能検証行程

	設計フェーズ(2011年11月～)	施工フェーズ(2013年1月～)		運用フェーズ(2015年7月～)	
	基本計画・基本設計・実施設計	施工・監理		入居前検証	入居後
省エネ 省資源	<ul style="list-style-type: none"> Energy+による建物性能目標設定 LCEMによる空調設備性能目標設定 超節水器具、井水、雨水、厨房排水再利用設備を計画・設計 	<ul style="list-style-type: none"> 機器性能の監理(熱源機COP) LCEMによる検証を継続 	<ul style="list-style-type: none"> 実運転による初期性能の確認 	<ul style="list-style-type: none"> シーズン毎の実測による機能性能試験 BEMSで月ごとに水利用率の確認 	
室内 環境	<ul style="list-style-type: none"> BIM、CFD統合シミュレーション 省エネ、快適性向上、意匠性に配慮した空調方式を計画 日射低減、快適性向上、眺望確保したファサードデザインを計画 	<ul style="list-style-type: none"> モックアップで室内環境快適性を確認、施工フィードバック 	<ul style="list-style-type: none"> モックアップでの改善事項を施工に反映 	<ul style="list-style-type: none"> ペリメータを含めた室内環境計測 模擬負荷での設計性能の確認 自動制御ブラインド設定値最適化 	<ul style="list-style-type: none"> 各季の環境性能を実測により確認(竣工後2年間継続)
伝達	<ul style="list-style-type: none"> 各段階において施主要望事項をブリーフィング 	<ul style="list-style-type: none"> 設計意図伝達による施工段階の意識共有 	<ul style="list-style-type: none"> 取扱い説明 	<ul style="list-style-type: none"> 施主・運用者に検証結果の報告 性能検証結果を踏まえた運用マニュアルを作成し詳細な運用方法を提案 	

3.2.1 設計フェーズの検証計画概要

設計フェーズではモックアップを使用した被験者実験を行っている。実験は 2013 年 10 月 15 日～12 月 25 日に行われた。うち、被験者実験を行った期間は 2013 年 11 月 11 日～12 月 5 日である。実験室を使用した温熱環境実測により、微気流吹き出し口風向や設置高さの検討並びに快適性の評価等を行い、設計性能の確認や施工にフィードバックを行った。また、被験者実験を行うことで、運用時の設定温度や風速の強さの検討を行うことで運用方針の決定等を行った。

3.2.1.1 実験室諸条件

実験室諸条件を表 3.2 に示す。一般空調室と放射空調室を設けて比較検討を行った。また、外気を再現した前室をつくることで、被験者の体感を夏季定常状態にした。OA 負荷は温熱環境実測時のみ用い、被験者実験においては設置しなかった。

図 3.1 に実験室の平面図・断面図を示す。放射空調室は微気流併用型放射空調による執務室の一部を模擬している。天井は通水式放射パネルを 5°の傾斜で交互に逆勾配で設置した。外調機による天井内給気・床吸込みとし、送風機による微気流循環を行った。パネルへは送水温度を固定し、流量制御を実施した。実験室の写真を図 3.2 に示す。また、測定点を図 3.3 に示す。本研究では F 点 1100mm 高さにて測定した熱電対の温度とグローブ温度を分析に使用した。

表3.2 実験室諸条件

部屋名	面積	天井高	容積	換気回数	OA 負荷	人員密度	照明
放射室 (実建物)	-	2,800mm	-	2 回	35W/m ²	0.2 人/m ²	-
放射室	29.0m ²	2,800mm	82m ³	2 回	35W/m ²	0.2 人/m ²	75W(2.59W/m ²)
一般室	21.0m ²	2,800mm	58m ³	2 回	35W/m ²	0.2 人/m ²	44W(2.10W/m ²)

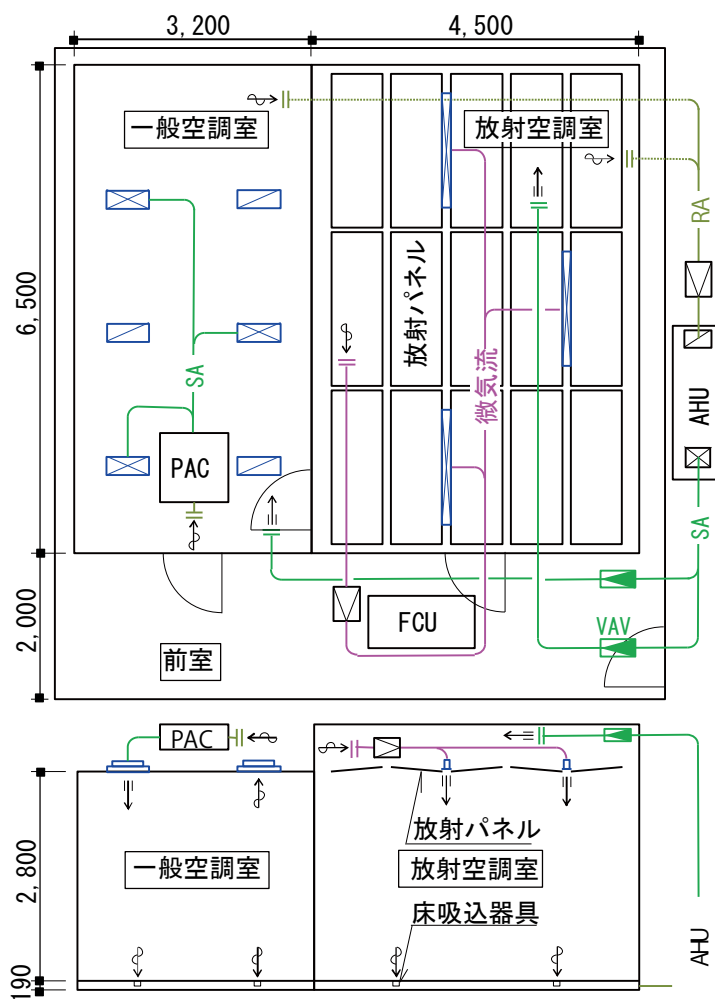


図3.1 平面図および断面図

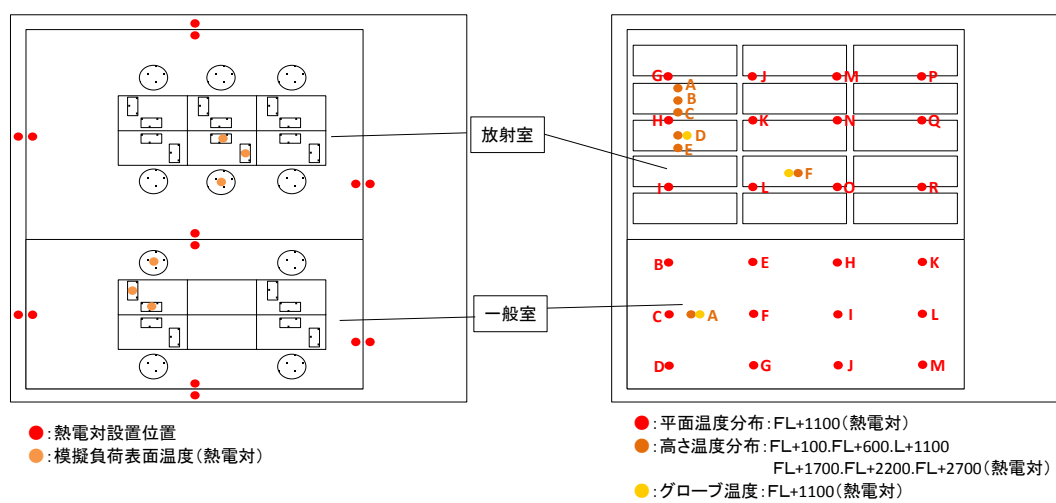


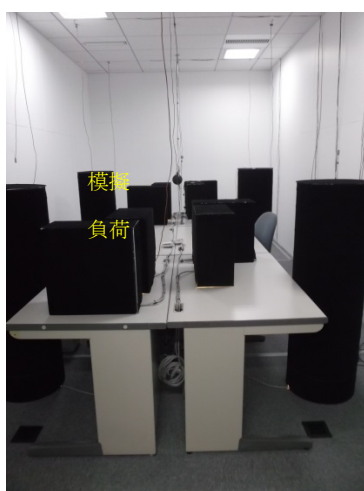
図3.2 測定点詳細



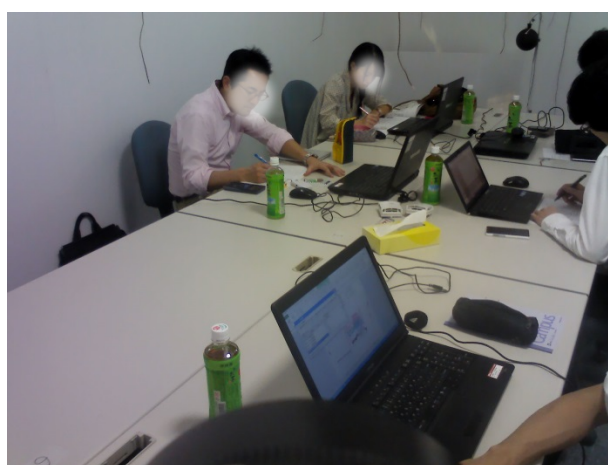
a. 前室 (外気再現室)



b. 前室 (外気再現室)



c. 一般室 模擬負荷設置時



d. 一般室 被験者実験時



e. 放射室 模擬負荷設置時



f. 放射室 被験者実験時

図3.3 実験室

3.2.1.1 実験概要

全室、一般空調室、放射空調室があり、実験は総数 94 名（男性 54 名、女性 30 名）を対象に行われた。「微気流に関する実験」「一般室と放射室との違い」「外から帰ってきたときの快適性」の 3 つを行い、その中で微気流の違いや温湿度を変化させ本方式におけるもっともバランスが取れた条件を把握することを目的とした。「微気流に関する実験」は、各設定温湿度条件で微気流無し、注、強、のケースをそれぞれ 40 分間体感してもらい、開始 35 分後にアンケート申告してもらった。「一般室と放射室の違い」は一般空調室にて 45 分執務をしてもらった後、放射空調室で同じように 45 分執務してもらった。その後、公平性を保つために再度一般室に入室してもらい被験者に回答してもらった。「外から帰ってきたときの快適性」は夏季の外気を想定した 34.3°C、56.4%の一般室で踏み台昇降を 5 分間行ってもらったのち、26°C、55%の放射室で 45 分間事務作業を行ってもらった。この実験は微気流無し、中、強それぞれで実施している。

以上 3 種類の実験を行った結果、既報にて以下のことが明らかとなっている。

- ・ 放射冷房方式は一般空調方式と比較して快適である。
- ・ 放射冷房空間の真夏、中間期における快適・推奨設定条件は、クールビズ時に室温 27.5～28°C、湿度 55%程度で微気流中。中間期冷房時の室内温湿度は室温 26～27°C、湿度 50%程度で微気流無し
- ・ 執務室において、放射冷房と微気流を併用することにより温湿度条件の許容範囲が拡大し、中風速で快適範囲が拡大することを確認した。
- ・ 測定からの快適指標 PMV も被験者アンケート温冷感と同様の傾向である。

本研究では竣工した Y ビルにおける実測値と執務者の快適範囲を検討するため、この被験者実験結果を再度分析した。分析に使用した実験は「微気流に関する実験」である。この実験の実験スケジュールを図 3.4 に示す。各パターンの居住域風速は「微気流なし」0.06m/s、「微気流中(100m³/h/m)」0.17m/s、「微気流強(150m³/h/m)」0.21m/s である。本研究において分析は、実際の運用に反映した微気流”中”の模擬作業下における回答に着目して行った。実験は設定温湿度と送水温度、パネル表面温度からパターン分けして行われたが、分析はパネル表面温度 23.5°C 条件下におけるもののみを用いた。室内設定条件パターンと実測日を表 3.3 に示す。

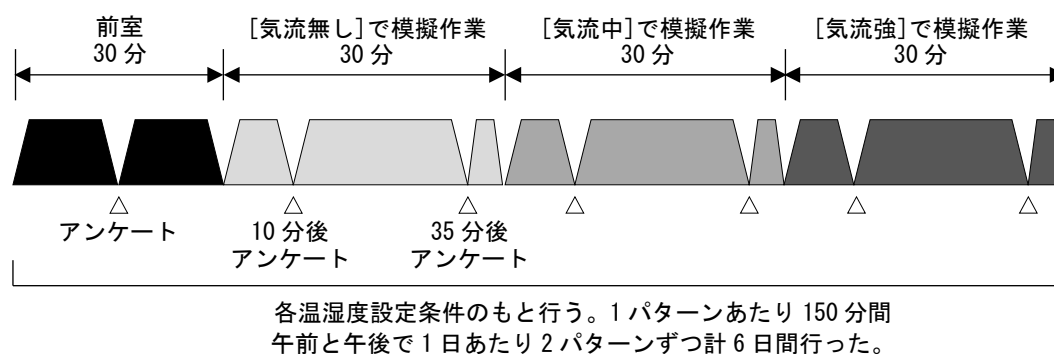


図3.5 アンケートスケジュール

表3.3 室内設定条件パターン

パターン	実測日	室温	相対湿度	送水温度	パネル温度	気流
1a	11 月 15 日	26°C	50%	17°C	23.5°C	無し 中 強
1b	11 月 21 日					
2	12 月 2 日	27°C	45%	17°C		
3	12 月 2 日		50%	17°C		
4	12 月 5 日		55%	17°C		
5a	11 月 15 日	27.5°C	45%	17°C		
5b	11 月 21 日					
6a	11 月 14 日		50%	17°C		
6b	11 月 25 日					
7a	11 月 14 日		55%	19°C		
7b	11 月 25 日					
8	12 月 5 日	28°C	40%	17°C		
9a	11 月 11 日		45%	17°C		
9b	11 月 23 日					
10a	11 月 12 日		50%	17°C		
10b	11 月 24 日					
11a	11 月 13 日		55%	19°C		
11b	11 月 22 日					

3.2.2 運用フェーズの検証計画概要

運用フェーズの検証は表 3.1 の通り、入居前検証と運用時検証に分類される。夏季入居前検証では模擬負荷を設置して設定温度と微気流の有無により空調設定条件別の室内温熱環境を実測調査した。検証結果は運用にフィードバックを行い、2016 年夏季の運用は 27°C にて行った。

運用時検証は夏季・冬季・中間季(春)と行い、冬季は 1 年目検証と 2 年目検証と 2 回行った。表には表のとおり、温熱環境実測と並行してアンケート調査を行うことで、定量的評価と執務者の主観的評価の両側面から執務空間の快適性に関する検証を行った。

表3.4 運用フェーズの検証計画

		2015 年		2016 年				2017 年			
		運用フェーズ									
		入居前検証		運用時検証							
		夏季実測 7 月 25 日～8 月 5 日		冬季実測 1 月 30 日～2 月 7 日		中間季実測(春) 4 月 16 日～4 月 24 日		夏季実測 7 月 16 日～8 月 14 日		冬季実測 1 月 7 日～1 月 21 日	
室内 温熱 環境	測定・調査項目	空調設定値別 室内温熱環境		運用時空調設定温度における室内温熱環境							
		手動測定		手動測定				パネル性能試験		手動測定	
				アンケート調査				アンケート調査		アンケート調査	
	フィードバック	設定温度 27℃ に決定		ペリメータの風量変更を行うことが決定		外気冷房特性確認		27℃ 設定におけるアンケート評価確認		昨年度調整後のアンケート評価確認	

3.2.2.1 測定スケジュール

(1)夏季入居前検証

表 3.2 に夏季入居前検証の測定日の中でもデータ取得が可能であった日を示す。機器設置は 7 月 25 日に行った。執務者の入居前であったため、模擬負荷を設置し、空調設定条件別に室内温熱環境の検証を行った。設定温度 3 パターン 26°C、27°C、28°C、微気流「あり」「なし」2 パターンを組み合わせ合わせた合計 6 パターンにて検証を行った。固定設置による測定と移動計測機器等を使用した手動計測を調査項目とした。また空調運転スケジュールは表 3.3 のように行った。

表3.5 夏季入居前検証スケジュール

		7/29	7/30	7/31	8/1	8/2	8/3	8/4
設定条件	温度	26℃	28℃	27℃	26℃	27℃	28℃	26℃
	微気流	あり			なし			あり
調査項目		温熱環境測定						

表3.6 空調運転スケジュール

7:00	運転開始（立ち上げ運転）
8:30	運転変更（設定温湿度）
9:30	測定開始、模擬負荷 100%点灯
11:45	模擬負荷 50%点灯
12:45	模擬負荷 100%点灯
17:30	測定終了、模擬負荷 off

(2)冬季 1 年目検証

2016 年冬季検証は温熱環境測定とアンケート調査をどちらも 5 階を対象に行った。温熱環境測定は 1 月 30 日から 2 月 7 日にかけて行った。測定スケジュールを表 3.4 に示す。インテリアの設定温度は全日程 22°C で運用を行ったが、ペリメータの設定温度は 1 月 24 日以降、22°C から 20°C に変更している。また、機器設置日と機器撤収日にそれぞれ移動計測機器を用いた手動測定を行った。

表3.7 冬季 1 年目検証スケジュール

		1/30	1/31	2/1	2/2	2/3	2/4	2/5
空調条件	温度	インテリア 22℃/ペリメータ 22℃					ペリメータ 20℃	
	微気流	なし						
調査項目	温熱環境	機器設置	○	○	○	○	○	○
	アンケート	-	-	-	-	-	-	○
		2/6	2/7	2/8	2/9	2/10		
空調条件	温度	インテリア 22℃/ペリメータ 20℃						
	微気流	なし						
調査項目	温熱環境	○	機器撤収	-	-	-		
	アンケート	-	-	○	○	○		

(3)中間季(春)検証

中間季は各階室内条件と外気条件を比較し、外冷有効の場合に外冷ファンによる外気冷房が行われる。外気冷房条件は以下となる。

- ・ 外気温度(16°C DP～23°C DP) > 室内温度
- ・ 外気エンタルピ < 室内エンタルピ
- ・ 外気露点温度 < 外気露点温度上限値 (13°C DP)
- ・ 外気露点温度 > 外気露点温度下限値 (3°C DP)

検証は 4 月 16 日から 4 月 23 日の 1 週間にて行った。検証スケジュールを表 3.5 に示す。手動測定は行わず、平日の自動計測のみ行った。1 週間の間にすべてのパターン「放射空調の

み」「放射空調＋外気冷房」「外気冷房のみ」「どちらも停止」での運用が見られた。本研究では中間季検証結果を分析対象外としたため、測定結果は付録に示す。

表3.8 中間季検証スケジュール

		4/16	4/17	4/18	4/19	4/20	4/21	4/22
空調運転	放射空調	-	-	×	○	○	×	○
状況	外冷	△	×	△	○	○	×	×
調査項目	温熱環境	機器設置	○	○	○	○	○	○
		4/23						
空調運転	放射空調	-						
状況	外冷	×						
調査項目	温熱環境	機器撤収						

(4)夏季検証

2016 年夏季検証は単体パネル性能検証(8 階にて実施)を 7 月 16 日から 8 月 14 日まで、温熱環境測定(5 階にて実施)を 7 月 30 日から 8 月 14 日まで、アンケート調査(5 階にて実施)を 8 月 9 日、8 月 10 日に行った。パネル性能検証を早めに始めたものの、7 月は立ち上げ時以外の時間帯のパネルへの通水があまり行われなかったため、7 月 29 日まではデータの分析対象外としている。表 3.4 に 7 月 30 日以降の測定スケジュールを示す。5 階執務者の夏季休業は 8 月 12 日から、8 階執務者の夏季休業は特定日ではなかった。よって、8 月 11 日までの測定データは通常業務日の内部発熱量であった。8 月 9 日以降に特定箇所において設定温度の変更を行ったのはサーマルマネキンの空調設定条件別の効果を検証するためである。

表3.9 2016 年夏季検証スケジュール

		7/30	7/31	8/1	8/2	8/3	8/4	8/5
空調条件	温度	27℃						
	微気流	あり						
調査項目	温熱環境	機器設置	○	○	○	○	○	○
	アンケート	-	-	-	-	-	-	○
		8/6	8/7	8/8	8/9	8/10	8/11	8/12
空調条件	温度	27℃			※	※	※	※
	微気流	あり						
調査項目	温熱環境	確認	○	○	○	○	○	○
	アンケート			○	○	○	-	-
		8/13	8/14	※8/9 : 15:30～18:00 8 階計測エリアのみ 26℃ ※8/10 : 5 階サーマルマネキンエリア 26.5℃ 15:00～18:00 執務室北側重点計測エリア 26.5℃ ※8/11 : 5 階サーマルマネキンエリア 26℃ 15:00～18:00 執務室北側重点計測エリア 26℃				
空調条件	温度	-	26℃					
	微気流	あり	なし					
調査項目	温熱環境	○	機器撤収					
	アンケート	-	-					

3.3 測定手法と分析方法

図 3.1 に実測対象フロアの平面図を示す。インテリアは A 点、B 点の 2 ヶ所、ペリメータは C 点の 1 ヶ所を測定対象ポイントとした。D 点は 2016 年夏季検証、2017 年冬季 2 年目検証にて行ったサーマルマネキン測定ポイントである。温熱環境測定は入居前のみ 8 階で行い、2016 年からの検証は 5 階で行っている。熱流センサ等によるパネル性能評価は施工段階から流量計が 8 階に設置してあるため、8 階で行った。形態係数の算出に用いる魚眼カメラでの撮影は A 点、B 点、C 点全てで行ったが、形態係数の算出は代表点を B 点としたため、MRT の算出に用いる表面温度測定は B 点周辺にて行っている。図面上に示す矢印は手動計測による断面温度・風速分布測定場所となる。風速の測定は A 点、C 点にて行った。

以上の測定点における詳細測定手法や分析に用いた式、既往研究等を次項に示す。



図3.6 測定対象フロア平面図と測定点

また、入居前検証にて行った模擬負荷の設置は図に示す点に設置した。負荷に使用したブラックライトと気化式加湿器を図に示す。ブラックライトは $25\text{W}/\text{m}^2$ 、気化式加湿器は $10.15\text{mL}/\text{h}$ とし、設計内部負荷率を想定して設置を行った。ただし、ブラックライトは天井に反射し熱画像が取れなくなることを防止するため、アルミホイルを巻き付けた。

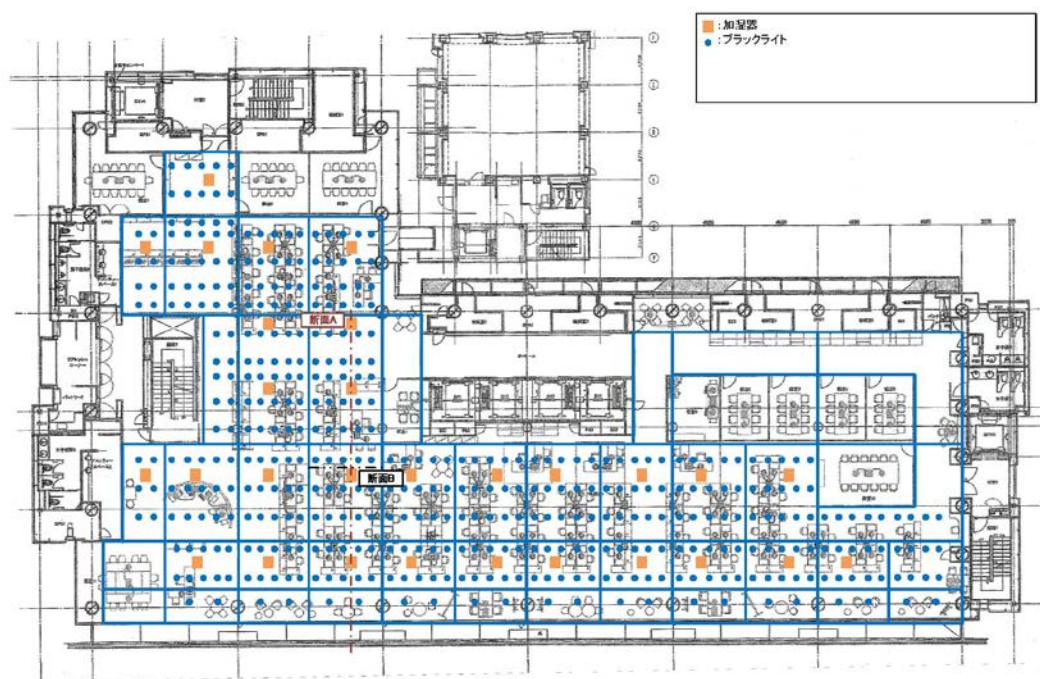


図3.7 模擬負荷設置点



図3.8 ブラックライト

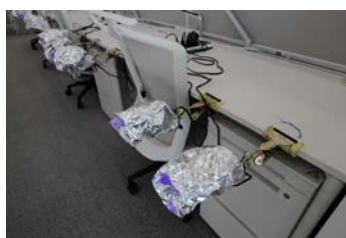


図3.9 気化式加湿器

3.3.1 温熱環境

3.3.1.1 使用機器

測定に用いた機器を 3.7 表に示す。常時測定では CADAC、THERMIC、おんどとりにおける測定は全て 1 分瞬時値で測定した。多機能型風速計は 5 分平均値とし、超音波三次元風速計は 0.01 秒瞬時値を測定している。また、手動測定は風速断面分布は 5 秒平均値、温熱環境断面分布は 30 秒間隔にて各ポイントにおいて測定を行っている。

表3.10 温熱環境測定使用機器

使用機器名	メーカー	測定目的
ビニール被覆熱電対 0.2mm	二宮電線工業株式会社	温度
グローブサーモメーターベルノン式 150mm	柴田化学株式会社	グローブ温度
おんどとり RTR-503	T&D	温度・湿度
クリーンルーム用超音波風速計 WA-790	株式会社ソニック	風速
多機能型風速・風量計クリモマスター プローブ 6543-21	日本カノマックス株式会社	風速
多点風速計 プローブ	日本カノマックス株式会社	風速
CADAC21、CADAC2	江藤電気株式会社	ロガー
THERMIC MODEL 2300A	江藤電気株式会社	ロガー
赤外線サーモグラフィカメラ InfReC R500	日本アビオニクス株式会社	熱画像
魚眼カメラ	-	-

3.3.1.2 詳細設置状況

(1) 上下温度分布と風速測定

上下温度分布は各測定点において 100mm から 500mm 間隔にて 1 分間隔の瞬時値にて測定している。各測定の様子を図に示す。風速の測定は高さ 1100mm の位置にインテリア A 点にて三次元風速計を用い、ペリメータは C 点にて熱線風速計を用いて測定した。風速の測定の様子を図に示す。



A 点
(窓から 20m 付近)



B 点
(窓から 13m 付近)



C 点
(窓から 1m)

図3.10 上下温度分布測定設置図



三次元風速計



二次元風速計

図3.11 風速測定設置図

(2)表面温度

表面温度の測定は形態係数を用いて MRT の算出を行うために行った。測定点と熱電対による測定写真を図 3.4 に示す。B 点付近のパネル表面、壁、家具（キャビネット）、床、照明、天井、窓を測定点とした。これは、2015 年夏季検証にて撮影したサーモカメラによる熱画像から決定した。

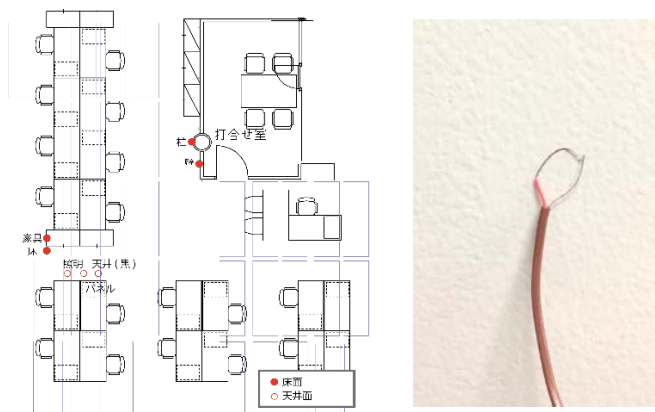


図3.12 表面温度測定詳細

(3)空調吹き出し口、

空調吹き出し口・吸い込み口温湿度の測定はおんどとりを用いて行った。天井内側（パネルスラブ側）と室内側にて測定を行った。Y ビルにおける放射パネルは開閉可能であるため、天井内側のおんどとりはパネルをあけて設置した。パネル冬季測定点をベースに、夏季は微気流室側吹き出し口・天井上側吸い込み口を追加して測定を行った。また、空調吹き出し口の測定と共に居住域高さ 1100mm にも同様におんどとりを設置した。これは、湿度を測定するために用いた。おんどとり設置点を表 3.8 に示す。また、設置写真を図 3.5 に示す。

表3.11 おんどとり設置点

測定点名	測定場所
A 点高さ 1100mm	A 点
B 点高さ 1100mm	B 点
C 点高さ 1100mm	C 点
室内微気流 SA	B 点
天井内微気流 RA	B 点
天井内デシカント SA	B 点と C 点の中間地点
室内デシカント RA	B 点
室内チルドビーム SA	C 点
室内チルドビーム RA	C 点
天井内チルドビーム RA	B 点と C 点の中間地点



天井パネル上側のダクト



デシカント SA



デシカント RA



チルドビーム SA,RA



高さ 1100mm 測定点



微気流 SA

図3.13 おんどとり設置点

(3)手動計測

手動測定は断面温熱環境計測、断面風速分布計測、サーモ画像撮影を行った。測定は 2015 年夏季入居前検証、2016 年冬季 1 年目検証、2017 年冬季 2 年目検証にて行った。

断面温熱環境測定は図 3.6 の手動測定機器を用い、インテリアとペリメータにて行った。インテリアは 250mm 間隔でパネル 5 枚分、ペリメータは 250mm 間隔で 8 点、500mm 間隔で 11 点行った、測定点断面図を図 3.7 と図 3.8 に示す。

断面風速分布の測定は図 3.9 に示す写真のように熱線式風速計と網を使用して、各測定点において 5 秒平均値を取得した。測定点は網を用いたメッシュを基準とし、図 3.10、図 3.11 の測定点にてインテリア、ペリメータそれぞれ行った。

サーモ画像撮影は実測初日に測定点を決定し、各測定点において 1 時間半おきのデータを取得した。

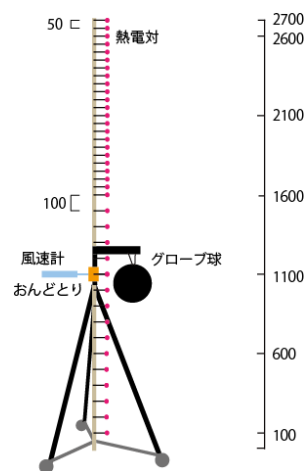


図3.14 手動計測機器



図3.15 移動計測の様子

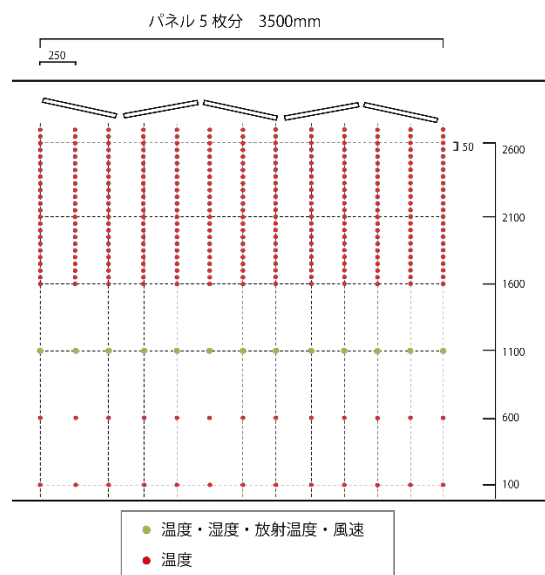


図3.16 インテリア断面温度分布測定点

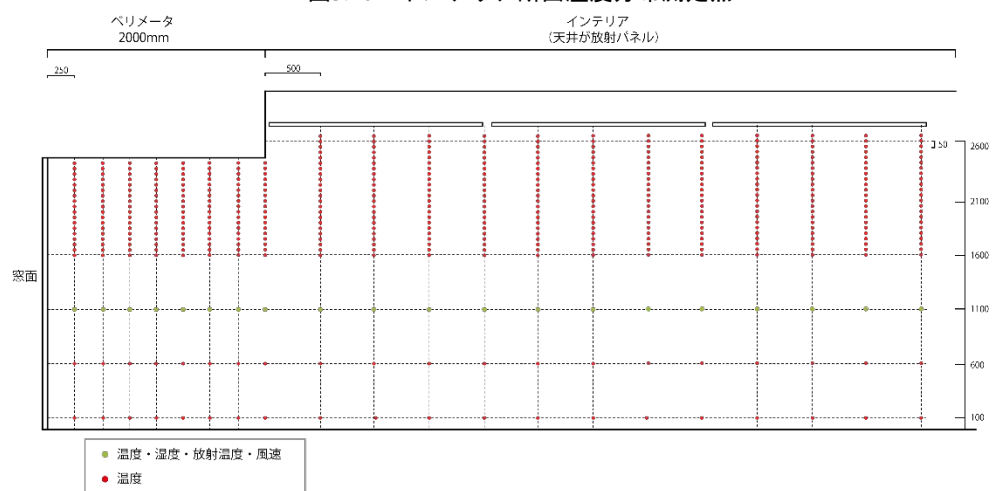


図3.17 ペリメータ断面温度分布測定点



図3.18 風速手動計測の様子

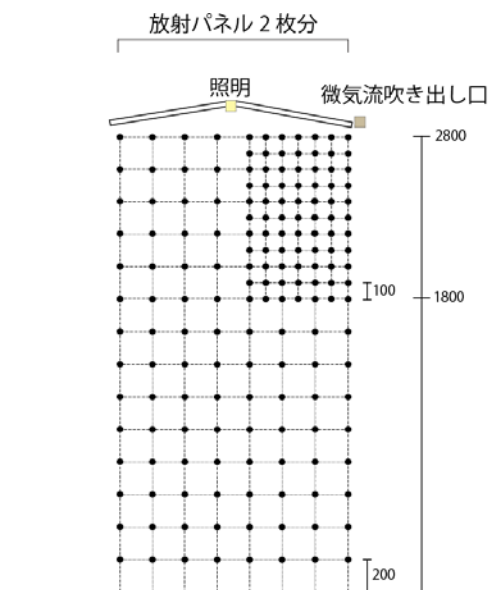


図3.19 インテリア断面風速分布測定点

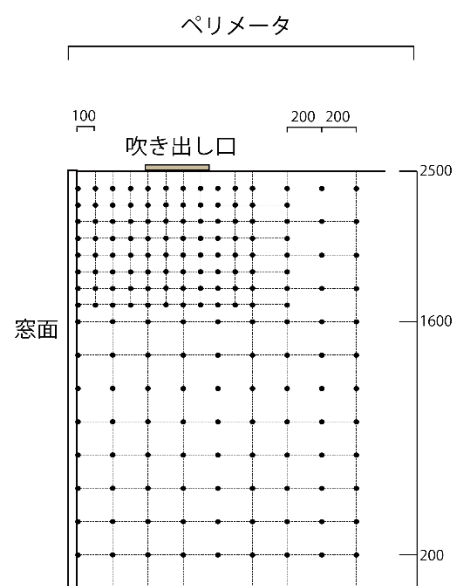


図3.20 ペリメータ断面風速分布測定点

(4)多点風速

多点風速計を用いた測定は、上下風速分布の時系列データを取得するために行った。測定は2016年夏季運用時検証にて行った。インターバルは1分瞬時値とした



図3.21 多点風速設置図

(5)レーザーによる気流可視化実験

気流の可視化実験は8月3日の20時から始めた。可視化は、インテリア「微気流あり」「微気流なし」とペリメータにて行った。可視化に使用した機材を図に示す。



図3.22 スモークマシン



図3.23 グリーンレーザー

3.3.1.3 分析に用いた式

分析に用いた式は以下である。

(1)MRT

MRT の算出は形態係数と表面温度を用いたものと、グローブ温度を用いたものがある。形態係数は魚眼カメラと SP CONV を用いた算出した。この形態係数と式 3.1 を用いて MRT を算出する。式 3.1 は着座時の人体を対象とした式である。また、グローブ温度を用いた算出式を式 3.2 に示す。どちらも ISO7726 を参照とした。

$$t_r = \frac{0.18(t_{pr}[up] + t_{pr}[down]) + 0.22(t_{pr}[right] + t_{pr}[left]) + 0.30(t_{pr}[front] + t_{pr}[back])}{2(0.18 + 0.22 + 0.30)}$$

$$t_r = \left\{ (t_g + 273)^4 + 2.5 \times 10^8 \times v_a^{0.6} (t_g - t_a) \right\}^{1/4} - 273$$

(2)絶対湿度

絶対湿度の算出は下記式にて行った。

3.3.2 サーマルマネキンを用いた測定

サーマルマネキンの設定温度は表に示す通りである。

YKK80 ビルでの測定と条件と同様に測定を行う。

(1)服装

クールビズ着用

服	材質	色	clo[ISO9220]	m ² ・K/W	グラム数	参照元
スラックス	ポリエステル100%	黒	0.25		未計量	Table B.1
シャツ	綿45%、ポリエステル55%	白	0.32	0.495		Table B.2 No(50+51)/2
靴	メイン素材:合成皮革、表地:フェイクレザー	黒	0.02	0.003		Table B.2 No255
下着(上)	綿23%、ポリエステル77%	白	0.06	0.009		Table B.2 No13
下着(下)	綿100%、ウエスト部分ポリエステル100%	紺(水玉)	0.04	0.006		Table B.2 No7
靴下	ポリエステル98%、ポリウレタン2%	黒	0.03	0.005		Table B.2 No265
カッタ	土台メッシュ加工	灰色				

(2)設定

等表面温度制御にて測定を行う。設定値は田辺らの研究³⁾を参考とした。

部位	頭部	胸部前	胸部後	腰部前	腰部後	右上腕部	右前腕部
表面温度[°C]	35.6	33.6	33.2	33.4	33.4	33.4	34.6

右手先部	左上腕部	左前腕部	左手先部	右大腿部	右下腿部	右足先部	左大腿部	左下腿部	左足先部
35.2	33.4	34.6	35.2	33.8	33.4	33.9	33.8	33.4	33.9

3.3.3 パネル単体性能

パネルの単体性能検証手法の提案を行った。

3.3.3.1 検証スケジュール

パネル単体性能試験は試験方法を模索しながら行った。パネル性能検証を行った実測スケジュールを表 3.10 に示す。表のように予備実測を東洋熱工業技術研究所にて行い、本実測をYKK80 ビルにて行った。2015 年と 2016 年の 2 年にわたって行った理由は、2015 年に提案した手法では正確な性能試験が行えなかったからである。実測機器の変更を行って 2016 年に再び予備実測を行い、手法の考案を行ったためである。4 章の結果では 2016 年の結果のみ示す。

実測名称	場所	期間
2015 年予備実測	東洋熱工業技術研究所	2015 年 6 月 9 日～2015 年 7 月 2 日
2015 年夏季検証	YKK80 ビル	2015 年 7 月 29 日～2015 年 8 月 4 日
2016 年予備実測	東洋熱工業技術研究所	2016 年 7 月 4 日～2016 年 7 月 13 日
2016 年夏季検証	YKK80 ビル	2016 年 7 月 14 日～8 月 14 日

3.3.3.2 2015 年予備実測検証手法

(1) 測定概要

2015 年の検証手法は 2013 年冬季に行ったモックアップ実験にて行った手法を採用した。技術研究所にて予備実測を行うことで、測定方法や使用機器の妥当性、測定点数の検討を行った。主な検討項目は以下の 3 点となる。使用機材を表 3.12 に示す。

- ・熱流計の使用サイズ（MF-200 か S11A か）の検討
- ・パネル表面温度分布の事前把握により、温度測定点の検討
- ・対流と放射の分離を正しく行えるかどうかを実測値にて検討

(2) 使用機材と測定点

技研における予備実測の機器設置状況を図に示す。

表3.12 使用機材

使用機器名	メーカー	測定目的
ビニール被覆熱電対 0.2mm	二宮電線工業株式会社	温度
グローブサーモメーターベルノン式 150mm	柴田化学株式会社	グローブ温度

ヒートセンサー(熱流計) MF-200	栄弘精機株式会社	熱流
汎用熱流センサ S11A	江藤電気株式会社	熱流
CADAC2	江藤電気株式会社	ロガー
赤外線サーモグラフィカメラ InfReC R500	日本アビオニクス株式会社	熱画像
小型流量センサ ビジョン 2000-4F44	有限会社グラーツ	流量

表3.13 2015 年実測パターン

パターン	設定温度	制御方法	模擬負荷	送水温度	測定日
1 (基準)	24℃	流量	一定	17℃	6 月 11,12,15 日,7 月 2 日
2	24℃	負荷発熱量	自動制御	17℃	6 月 11 日
3	28℃	流量	一定	17℃	6 月 12 日
4	24℃	流量	一定	21℃	6 月 12,15,30 日,7 月 2 日
5	24℃	流量	一定	19℃	6 月 17 日,7 月 2 日

(3) 放射と対流の分離に用いた式

(4) 本実測の結果

3.3.3.3 2016 年検証手法

(1) 測定概要

2016 年は 2015 年に得られた知見を活かして測定手法の再検討から行った。2015 年との大きな変更点は測定原理の異なる熱流センサの使用、センサ加工方法、放射と対流の分離に用いる式の変更である。

測定原理の異なる熱流センサは株式会社デンソーの RAFESPA を用いた。このセンサは従来の Ni 合金と銅を使用したものとは異なり、半導体を使用して測定する。PALAP(一括積層プロセス)を用いて作成されている。従来の熱流計測の最小厚みが 0.6mm であるのに対し、0.1mm とすることが可能であり、感度は 4 倍となる。

センサの加工方法の変更は株式会社デンソーの協力の下行うことができた。センサは 2 種類の使用とし、加工の施さない熱流計(放射率 $\alpha_1=0.85$)と、アルミ蒸着を行った熱流計(放射率 $\alpha_2=0.05$)を使用した(図 3.24)。各放射率は事前に検査を行っている。放射と対流の分離に用いた式については(3)に示す。

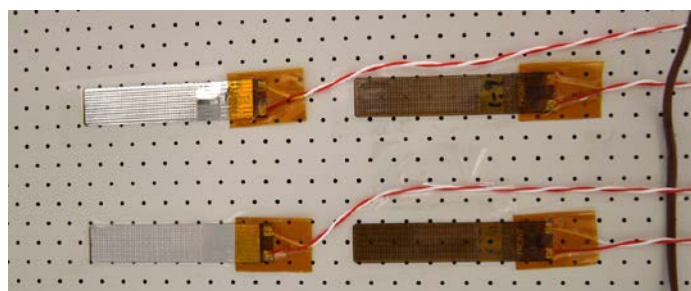


図3.24 アルミ蒸着センサと加工のないセンサ

(2) 使用機材と測定点

技研での予備実測は測定機器メーカーから設置方法等のレクチャーを受け、熱流計とテープの貼り付け方など設置方法の詳細検討を行うためのみ行い、大きな変更は行わなかった。以下本実測での設置手法を示す。

表 3.14 に使用機器を、図 3.25、図 3.26 にパネル断面図における測定点を示す。使用センサの平均感度は約 $11.91\mu\text{V}/\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ である。断面図のようにパネルの天井側は配管、ヒートシンク、パネルを測定点とし、室内側はパネル低温域と高音域を測定点とした。この 5 ヶ所の代表測定点ではそれぞれ熱電対による表面温度の測定と、2 種類の熱流計による熱流束の測定を行った。1 系統として通水される 5 枚パネルの中でも 1 枚目のパネルの通水入口付近にて測定を行った。また、同時にパネル 1 枚目、3 枚目、5 枚目の室内側中心表面温度の測定を行うことで、パネル間の温度差の測定も行った。流量は施工時に埋め込んだ流量計の測定結果が BEMS データとして記録される。

表3.14 使用機器

使用機器名	メーカー	測定目的
ビニール被覆熱電対 0.2mm	二宮電線工業株式会社	温度
熱流センサ RAFESPA D0002	株式会社デンソー	熱流
THERMIC MODEL 2300A	江藤電気株式会社	ロガー
小型流量センサ ビジョン 2000-4F44	有限会社グラーツ	流量

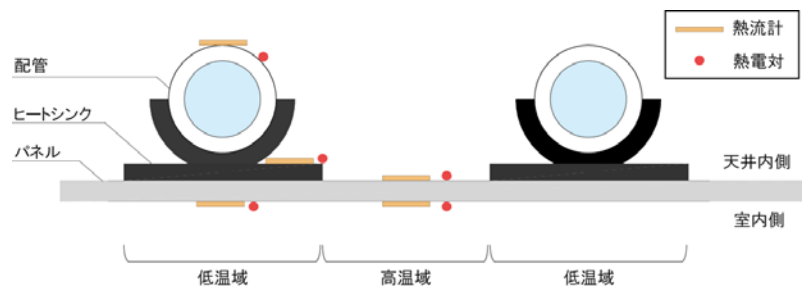


図3.25 測定断面図



図3.26 設置写真

(3) 放射と対流の分離に用いた式

放射成分と対流成分の分離は線形補間を行うことで算出した(図 3.26)。算出に用いた式を式 3.1、式 3.2、式 3.3 に示す。

$$\gamma = (q_1 - q_2) / (\alpha_1 - \alpha_2)$$

$$q_{pc} = q_1 - \gamma \alpha_1$$

$$q_{pr} = \gamma \alpha_p$$

また 5 ヶ所にて測定した結果はパネルの面積を正射投影して算出した比率で重み付け計算を行った。また、各部材の放射率は事前に検査にて求めている。パネル平面図と詳細情報を図 3.27 と表 3.15 に示す。

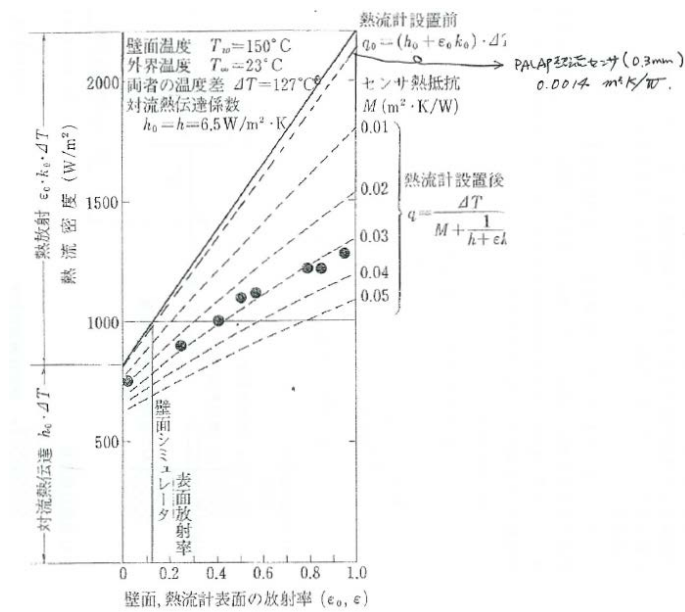


図3.27 線形補間の図（デンソー資料より抜粋）

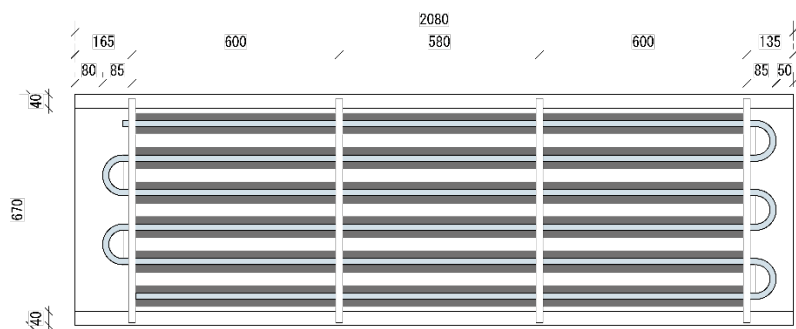


図3.28 放射パネル平面図

表3.15 放射パネル詳細情報

	部位名	面積	面積比率	放射率
天井側	配管	0.212m ²	15.2%	85.6%
	ヒートシンク	0.443 m ²	31.8%	83.0%
	パネル	0.739 m ²	53.0%	42.5%
室内側	パネル低温部	0.634 m ²	45.5%	79.4%
	パネル高温部	0.076 m ²	54.5%	

3.3.4 執務者アンケート調査

3.3.4.1 アンケート項目と回答手法

執務者アンケート調査は2016年冬季、2016年夏季、2017年冬季に行った。項目を表に示す。回答手法は6パターンに分類して表に示した。

(1) 自由記述

自由記述はアンケート記入日のみである。

(2) 番号選択方式

番号選択方式は2016年冬季にて全てこの形式で行った。一方で、2016年夏季と2017年冬季は連続尺度を用いたため、理由を問う場合や気流感申告等に用いた。例を下記に示す。

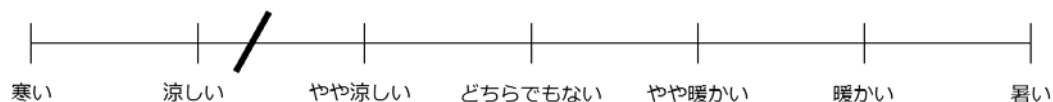
・あなたの年代をお答えください。

a.10代 b.20代 c.30代 d.40代 e.50代 f.60以上

(3) 7段階連続尺度

7段階連続尺度は主に温冷感の質問の際に用いた。2016年に行った番号選択形式のみでは回答が限定的になってしまうことから、2016年夏季から既往研究を参考に導入した。温冷感（-3：寒い、-2：涼しい、-1：やや涼しい、0：どちらでもない、+1：やや暖かい、+2：暖かい、+3：熱い）とし、分析は1メモリを10等分して小数点第一位まで回答とした。連続尺度の回答例を下記に示す。

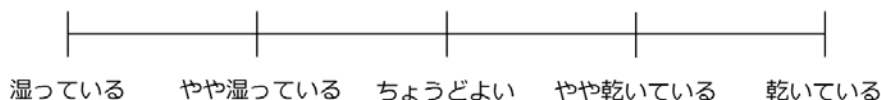
・頭部の温冷感はどうに感じますか



(4) 5段階連続尺度

5段階連続尺度は湿度感、気流の強さ、気流の温度に用いた。例を下記に示す。

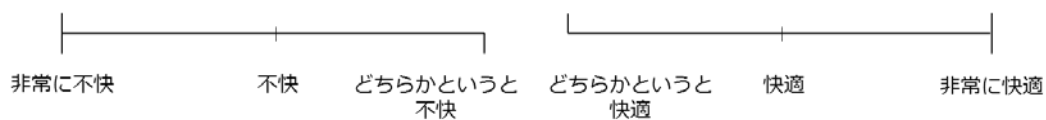
・この部屋の湿度はどうに感じますか



(5) 0の途切れた連続尺度

-0と+0の途切れた連続尺度の途切れた申告は、羽田らを参考に快適度、満足度、受容度等を申告する際に用いた。快適度を例にとると、スケールは（-2：非常に不快、-1：不快、-0：どちらかというと不快、+0：どちらかというと快適、+1：快適、+2：非常に快適）とした。例を下記に示す。

・執務空間としてこの室内の温熱環境はどうに感じていますか。



(6)パーセンテージを示す連続尺度

執務者の知的生産性を問うときに、用いた。設問も羽田らを参考に設定した。

・上記温熱環境があなたにとって最適な環境となった状態における作業能力を 100 とすると、現在の環境における作業能力はどれくらいになると思いますか

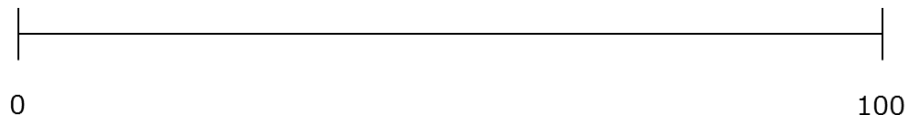


表3.16 アンケート項目と回答手法

実測期間	2016 冬季	2016 夏季	2017 冬季
基本情報			
アンケート記入日	1	1	1
あなたの年代をお答えください	2	2	2
あなたの性別をお答えください	2	2	2
あなたは暑がりですか、寒がりですか	2	2	2
現在の体調をお答えください	2	2	2
今現在身に着けている服装をお答えください	2	2	2
今現在行っている行為で当てはまるものをお答えください	2	2	2
あなたがだん仕事をしているフロアと座席の位置をお答えください	2	2	2
あなたは普段1日のうち平均どのくらい建物外にいますか	2	2	2
現在、座席に座ってからどのくらい時間が経っていますか	2	2	2
放射空調に関して			
頭部の温冷感はどうに感じますか	2	3	3
胴体部の温冷感はどうに感じますか	2	3	3
足元の温冷感はどうに感じますか	2	3	3
全身の温冷感はどうに感じますか	2	3	3
放射熱を感じますか	2	-	2
放射熱をどのように感じますか（快不快感）（放射熱を感じないと回答した人を除く	2	-	2
どの部位で放射熱を感じますか（放射熱を感じないと回答した人を除く	2	-	5
放射熱はどこから感じていますか（放射熱を感じないと回答した人を除く	2	-	2

現在の気流感（気流、風の体感）をどのように感じますか（快不快感）	2	5	-
気流を感じますか。	2	2	-
どの場所から気流を感じますか（気流を感じないと回答した人を除く）	2	-	-
気流の強さをどのように感じますか（気流を感じないと回答した人を除く）	2	4	-
気流の温度をどのように感じますか（気流を感じないと回答した人を除く）	2	4	-
この部屋の湿度はどのように感じますか	2	4	4
執務空間としてこの室内の温熱環境はどのように感じますか（快不快感）	2	5	5
執務空間としてこの室内の温熱環境を受け入れられますか	2	5	5
執務空間としてこの室内の温熱環境に対する満足度はどの程度ですか	2	5	5
上記温熱環境があなたにとって最適な環境となった状態における作業能力を 100 とすると、現在の環境における作業能力はどれくらいになると思いますか	2	6	6
本ビルに引っ越しされる直前に在籍されていたビルをお答えください	2	2	2
直前に在籍されていたビルと比較して、温熱環境の満足度はどの程度ですか。またその理由もお答えください。	2	5,2	5.2

3.3.4.2 着衣量の決定

着衣量の決定は ISO9920 を参考に行った。図に各期間の着衣量の項目を示す。

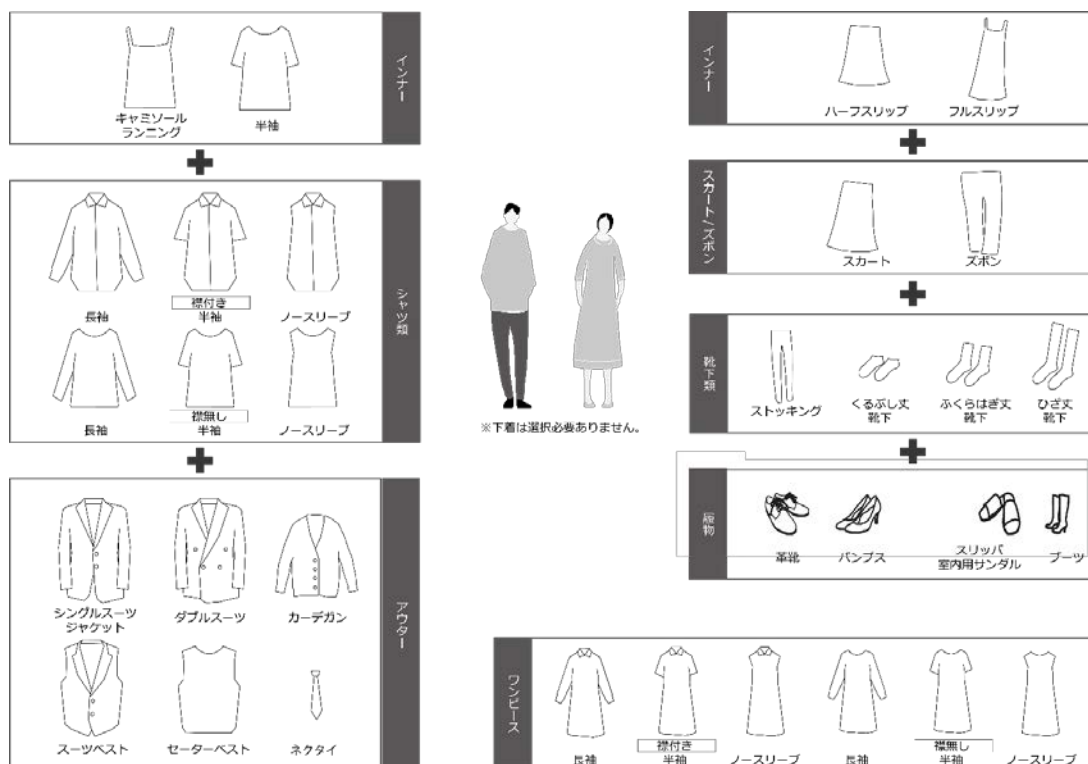


図3.29 2016 年夏季

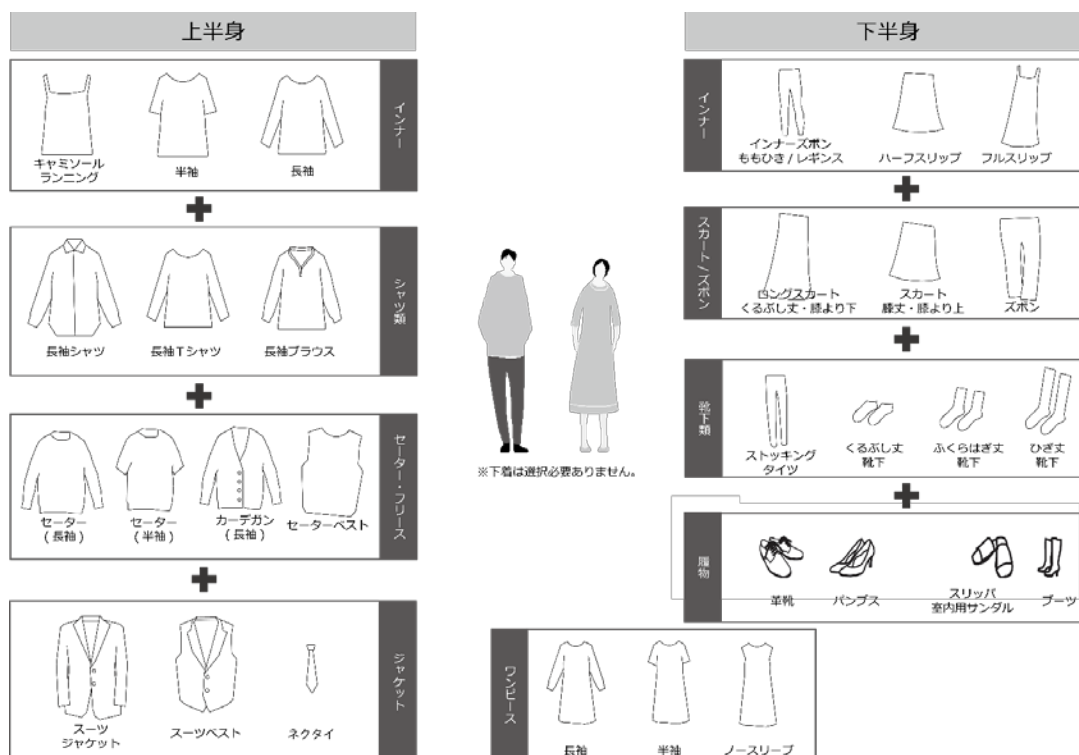


図3.30 2017 年冬季

表 3.10 に着衣量の決定値と参照限を示す。ストッキングのみ Table B.1 の I_{cl} を参考値とし通し番号とアンケート用紙の服の対応表を表 3.11 に示す。表には回答者のいた服のみを取り上げた。表から得られる単体衣服のクロ値より下記式から全身着衣量を算出した。

着衣量の式

表3.17 着衣量の決定

カテゴリー	通し番号	ISO9920 における名称	$I_{cl}[clo]$	参照表 (ISO9920)
Underwear- Pants	-	Pants, short-leg	0.04	Table B.2 No.7
	-	Bra and Panties	0.04	Table B.2 No.44
Underwear- Shirts	A-1	Shirts, sleeveless	0.06	Table B.2 No.136
	A-2	T-shirt	0.09	Table B.2
	A-3	Half slip	0.14	Table B.2 No.4
	A-4	Full Slip	0.16	Table B.2 No.5
Shirts	B-1	Long sleeves, shirts collar	0.31	Table B.2 No.51
	B-2	Short sleeves, shirts collar	0.25	Table B.2 No.53
	B-3	Sleeveless, scoop neck	0.16	Table B.2 No.58,59,68

	B-4	Cap sleeves, boat neck	0.21	Table B.2 No.67
	B-5	Sleeveless, scoop neck	0.16	Table B.2 No.58,59,68
Trousers	C-1	Straight,fitted/Straight,loose	0.175	Table B.2 No.102,109
Sweaters	B-6	Long-sleeve, V-neck cardigan	0.28	Table B.2 No.136
		Long-sleeve, round-neck cardigan		Table B.2 No.140,143
Dresses, skirts	D-1	A-line,knee-length	0.14	Table B.2 No.304
	D-2	Short sleeves, shirts collar, A-line,belt	0.29	Table B.2 No.333
	D-3	Sleeveless, scoop neck, A-line	0.23	Table B.2 No.334
Socks,shoes	E-1	Nylon stockings	0.03	Table B.1
	E-2	Socks, ankle-length	0.02	Table B.2 No.254
	E-3	Calf-length dress socks	0.03	Table B.2 No.265
	E-4	Knee socks(thin)	0.03	Table B.2 No.266
	E-5	Suede shoes, rubber shoes	0.02	Table B.2 No.255
	E-6	Suede shoes, rubber shoes	0.02	Table B.2 No.255
	E-7	Slippers, quilted fleece	0.03	Table B.2 No.261

表3.18 通し番号対応表

カテゴリー	通し番号	アンケート図	
Underwear-Shirts	A-1	インナー	キャミソール/ランニング
	A-2		半袖
	A-3		ハーフスリッパ
	A-4		フルスリッパ
Shirts	B-1	シャツ類	襟付き長袖
	B-2		襟付き半袖
	B-3		襟付きノースリーブ
	B-4		襟なし長袖
	B-5		襟なしノースリーブ
Trousers	C-1	スカート/ズボン	ズボン
Sweaters	B-6	アウター	カーデガン
Dresses, skirts	D-1	スカート/ズボン	スカート
	D-2	ワンピース	襟なし半袖
	D-3		襟なしノースリーブ
Socks,shoes	E-1	靴下類	ストッキング
	E-2		くるぶし丈靴下

	E-3		ふくらはぎ丈靴下
	E-4		ひざ丈靴下
	E-5	履物	革靴
	E-6		パンプス
	E-7		スリッパ

4 章 夏季冷房検証結果

4 夏季冷房検証結果

4.1 はじめに

夏季冷房検証は既述の通り 2015 年 7 月 30 日から同 8 月 4 日までの入居前検証と、2016 年 7 月 16 日から同 8 月 14 日までの運用時検証の 2 回行われた。入居前検証は模擬負荷を設置して、空調設定条件別 6 パターンの検証を行うことで、設定温度緩和効果や微気流の付加効果を温熱環境実測から明らかにした。運用時検証はモックアップ実験と入居前検証より決定した 27°C 設定での温熱環境を、実測とアンケート調査から明らかにすることで定量的な実測値と執務者の主観的評価から明らかにした。

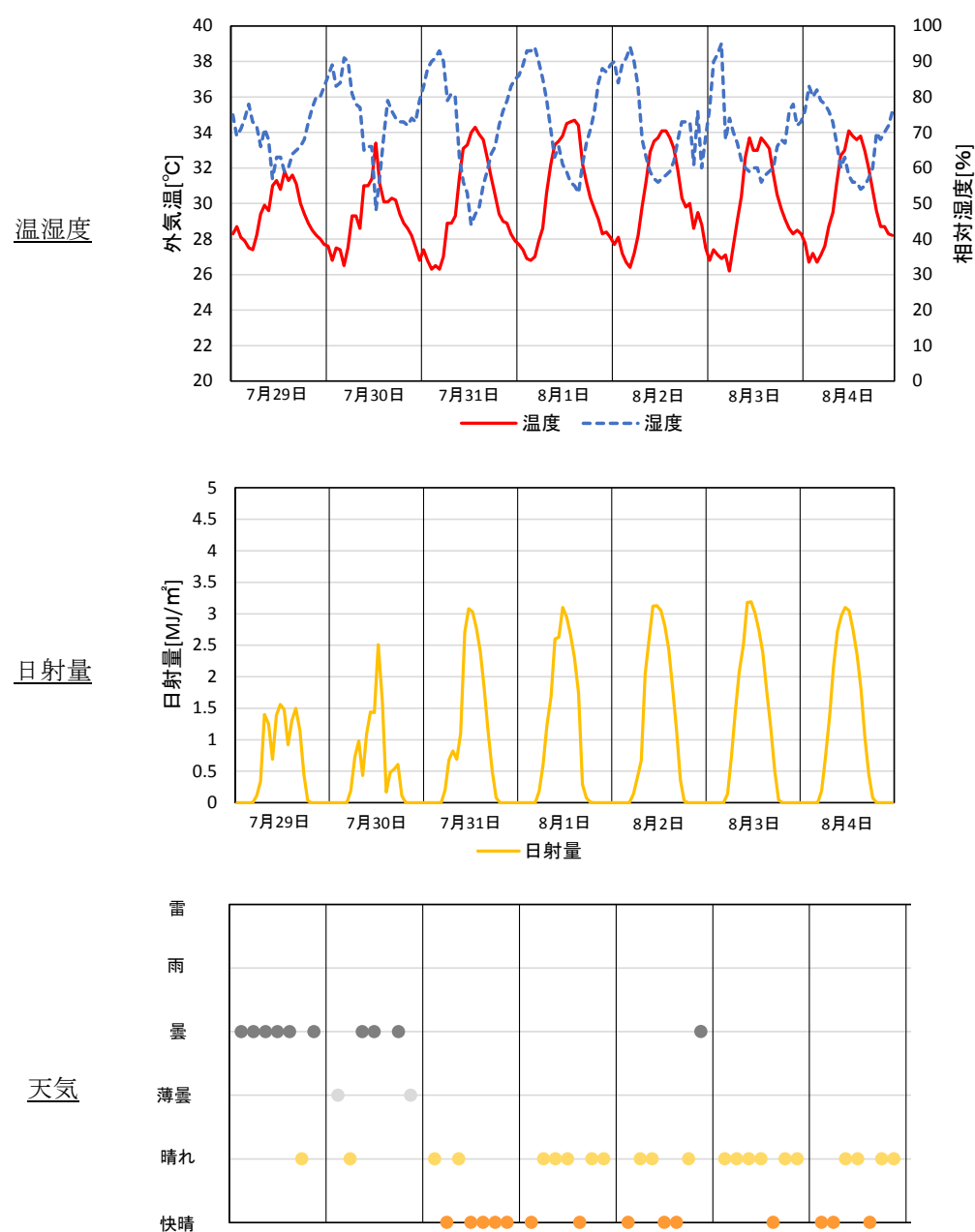
この章は検証対象から項に別れており、4.2 実験時の外気条件、定量的評価として、4.3 設定温度緩和効果、4.4 微気流の効果、4.5 パネル単体性能試験、主観的評価として 4.6 アンケート調査から構成される。

4.2 実測条件

実測期間中の外気条件を示す。気象データは国土交通省気象庁 HP¹⁾の 10 分ごとの値より引用している。東京都千代田区北の丸公園(緯度 35 度 41.5 分、経度 139 度 45.0 分)にある東京管区気象台のデータを使用した。このデータは地上気象観測装置により、降水量、気温、風向、風速、日照時間、を観測している。

4.2.1 気象条件

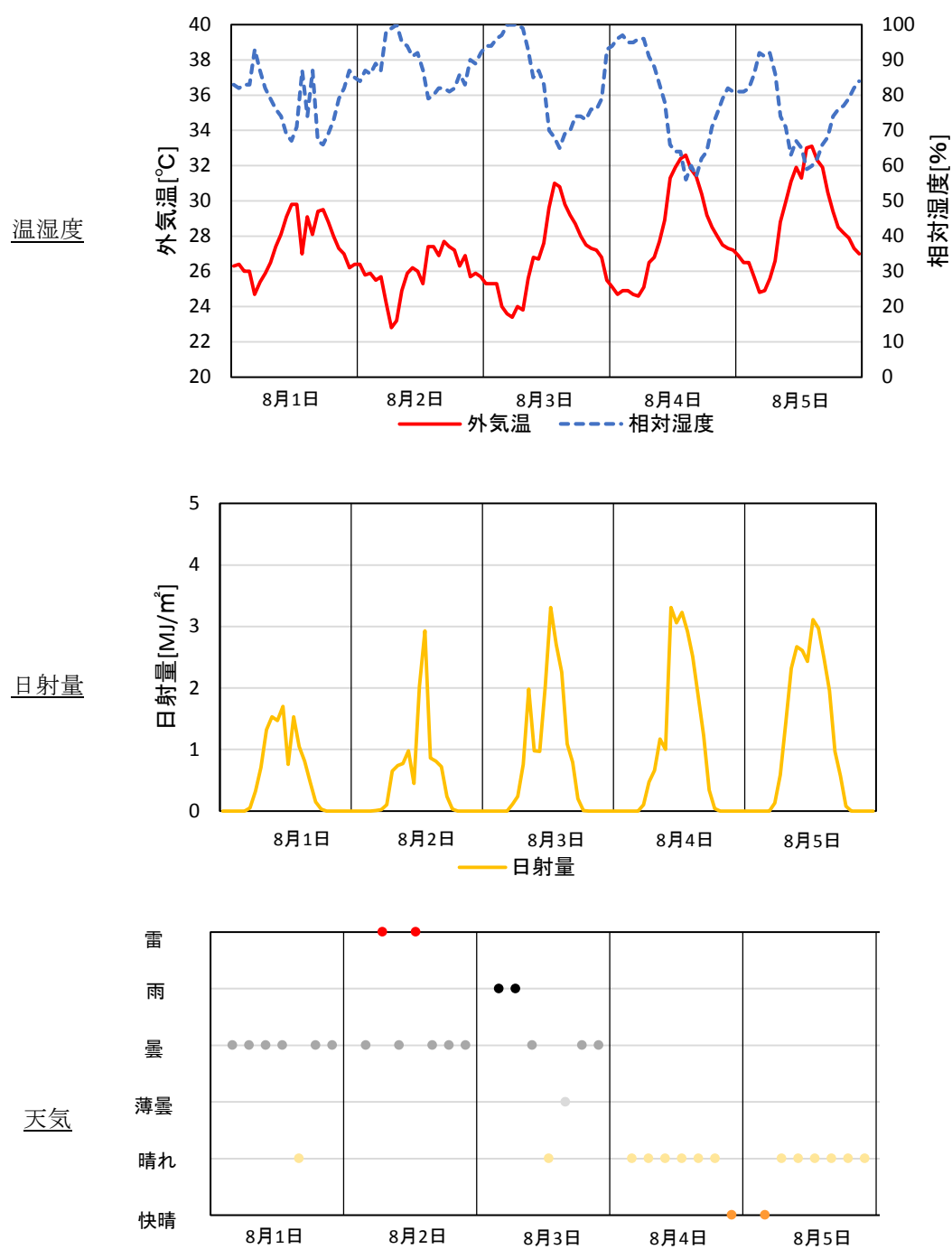
4.2.1.1 入居前検証気象データ



※天気観測は0時を除き、3時から3時間毎に行われている。

図4.1 気象状況 (2015年7月29日～同8月4日)

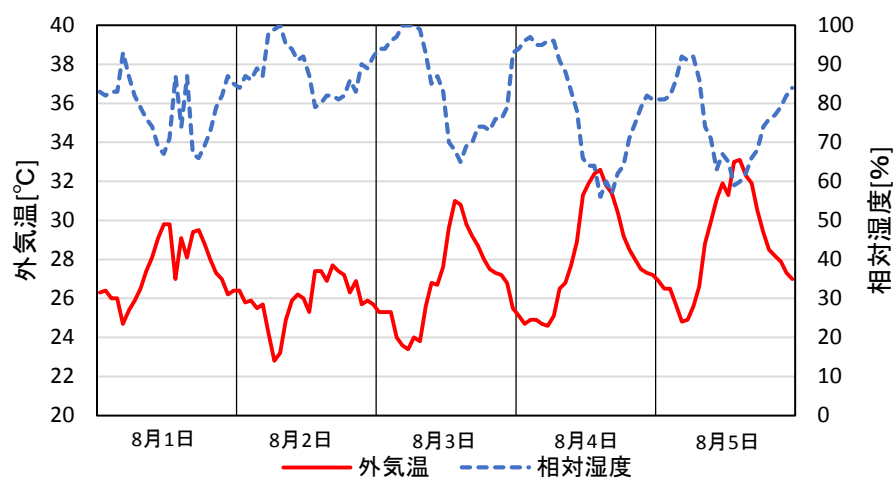
4.2.1.2 運用時検証気象データ



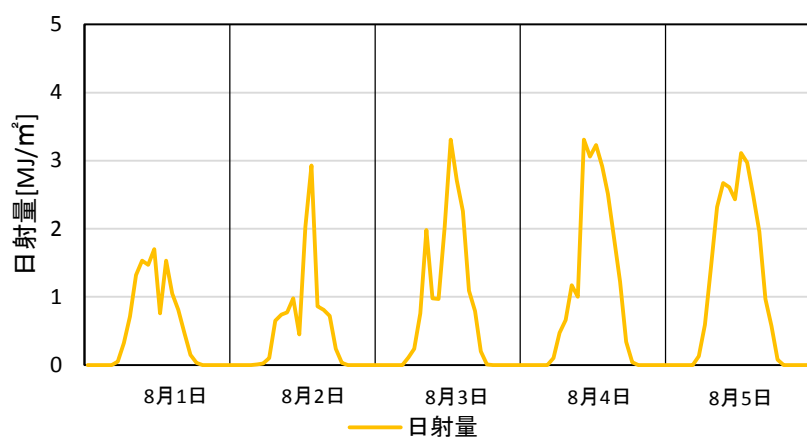
※天気の観測は0時を除き、3時から3時間毎に行われている。

図4.2 気象状況（2016年8月1日～同8月5日）

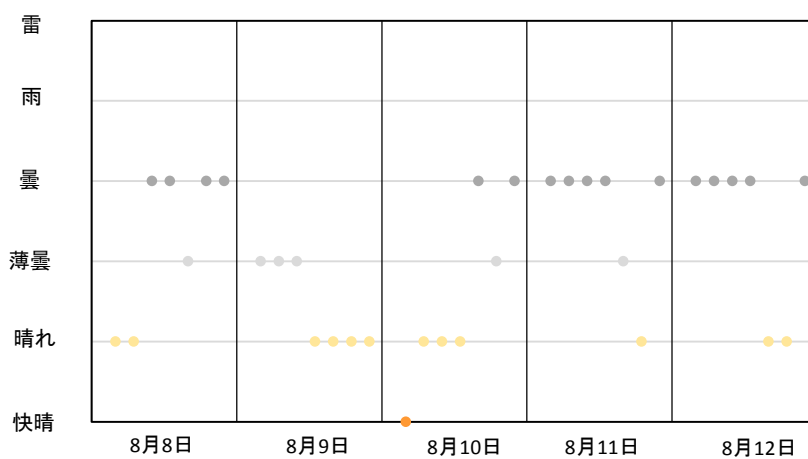
温湿度



日射量



天気



※天気の観測は0時を除き、3時から3時間毎に行われている。

図4.3 気象状況（2016年8月1日～同8月5日）

4.2.2 ペリメータ条件

4.2.2.1 温熱環境

図 4.4 と図 4.5 にペリメータにて運用時、2016 年 8 月 9 日に高さ 1100mm にて測定した、30 分平均時系列データを示す。西日の影響により温度、MRT 共に 13 時半から上昇しているが、室温の変動域は設定温度 1K 以内となっている。ただし求めた MRT はグローブ温度を使用している。湿度は一日を通して約 45% で一定であった。定常時における PMV 平均値は 0.85 であった。

図 4.6 に同日に測定した上下温度分布を示す。西日の影響のない 10 時と 13 時は同じ温度となっている。居住空間上下温度差は時刻に関わらず 0.8K 以内となった。

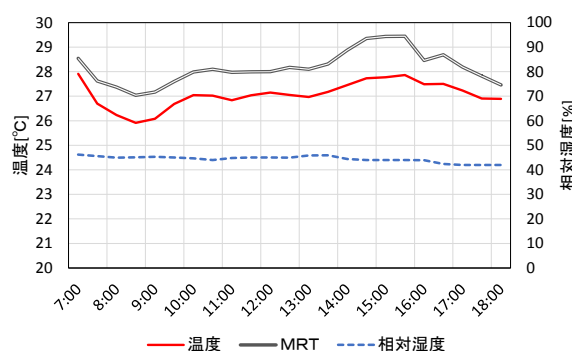


図4.4 ペリメータ時系列温熱環境データ

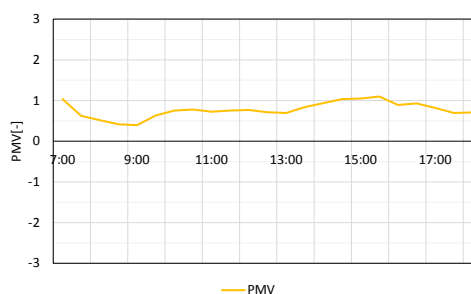


図4.5 ペリメータ PMV 時系列データ

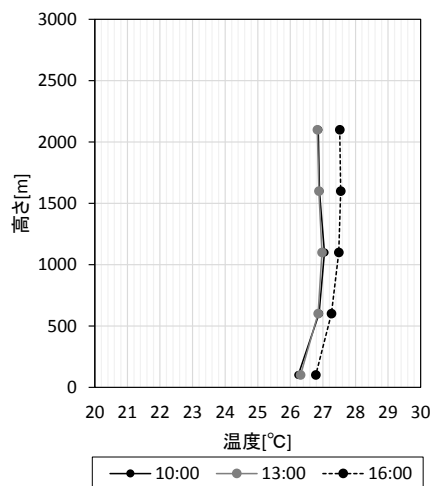


図4.6 ペリメータ上下温度分布

図 4.4 に 8 月 1 日 (26°C 設定) と 8 月 2 日 (27°C 設定) に移動計測機器にて手動測定を行った結果を示す。設定室温に関わらず窓面を流れる気流と室内側に吹き出す気流により、26°C 設定の結果では 26.5°C のペリメータ(窓から 2m まで)空間に対してインテリア空間は 26°C 以下となっていること、27°C 設定ではペリメータ・インテリア関わりなく 27°C 以下の執務空間となっていることが確認できた。

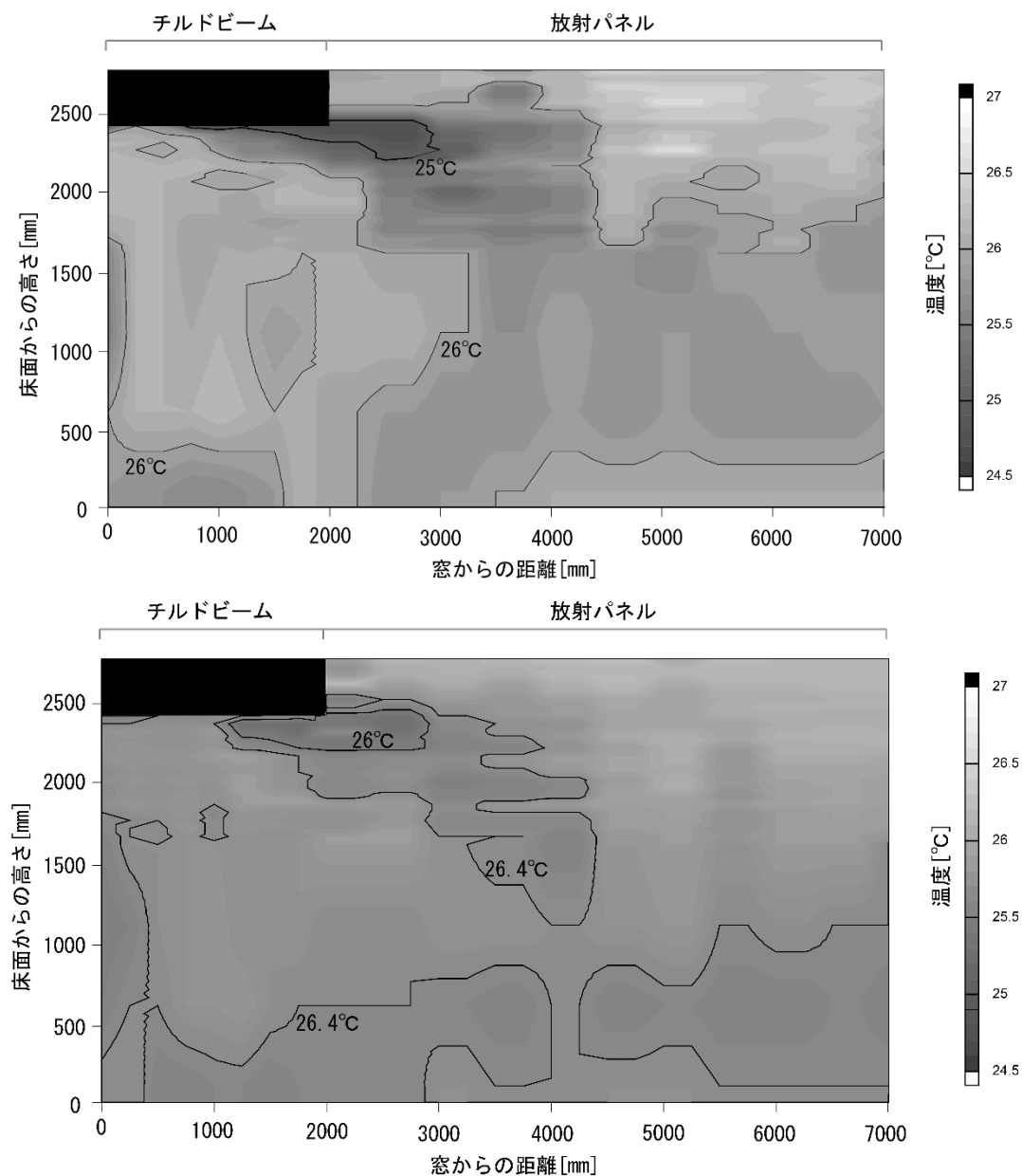


図4.7 ペリメータ温熱環境断面分布

4.2.2.2 風速分布

図 4.8 に運用時に取得した高さ 1100mm における風速の時系列データを示す。定常時の平均値は 0.118m/s であり、チルドビームによる強い気流は発生していないことがわかる。

図 4.4 に手動測定にて測定した気流断面分布を、図 4.5 にレーザーによる可視化実験結果を示す。図 4.4 より窓側に吹き出す気流は窓に沿って下降し、床へと流れることが確認された。このことより窓を直接冷却することで効果的に熱負荷を除去できていることが確認できる。また、窓近傍で 1.0m/s あった風速は窓から 1m 地点で高さ 500mm～1600mm では 0.2m/s 以下、足元も 0.5m/s 以下となる。窓から 2m 地点では足元も風速は 0.4m/s 以下なる。また、図 4.5 に示すレーザーによる可視化実験結果からも窓側面にと室内側の 2 つの方向に吹き出す気流が確認できた。

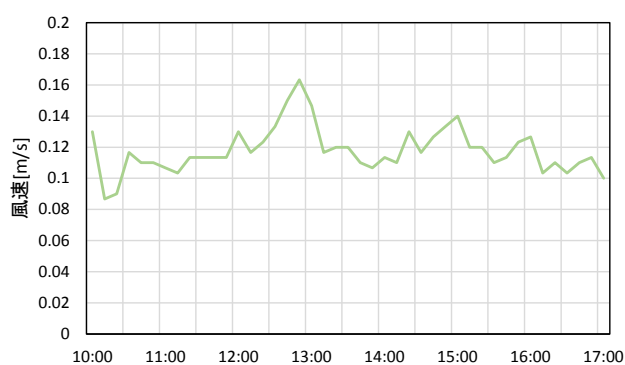


図4.8 風速 10 分平均値時系データ

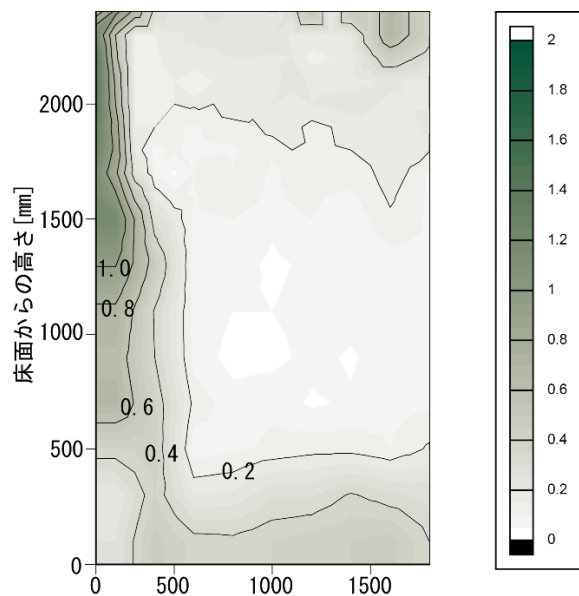


図4.9 気流断面分布



図4.10 レーザーによる可視化

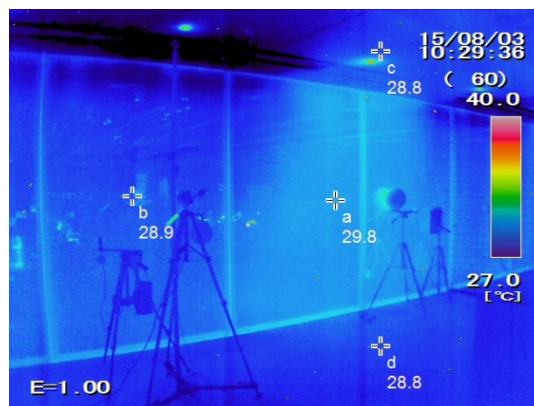
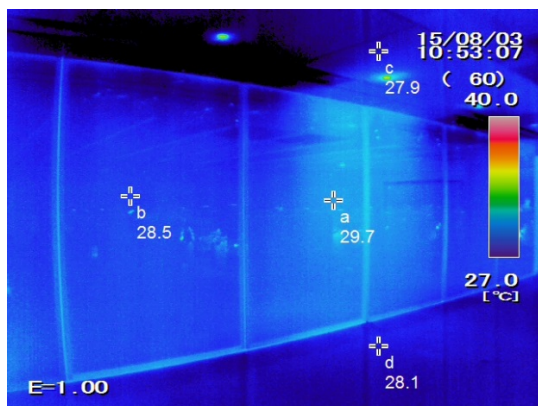
4.2.2.3 クライマーブラインドによる日射遮蔽効果

Y ビルは西面にクライマーブラインドを採用している。一般的なブラインドとは異なり眺望性を保ったまま日射を遮蔽することができることが特徴となっている。図 4.11 に時刻別にサーモカメラにて撮影した熱画像を示す。チルドビーム直下はブラインドの制御方法による窓の表面温度差が見られず、チルドビームにより適切に窓を冷却できていることが確認できる。2 台のチルドビームの間も自動制御の方が若干表面温度が高いものの、その差は 0.2K 程度であり、床の表面温度に差が見られないことから、ブラインドは適切に日射を遮蔽できている、眺望性という快適性を向上させた上で従来ブラインドと差異の小さい温熱環境を形成できていることが明らかとなった。

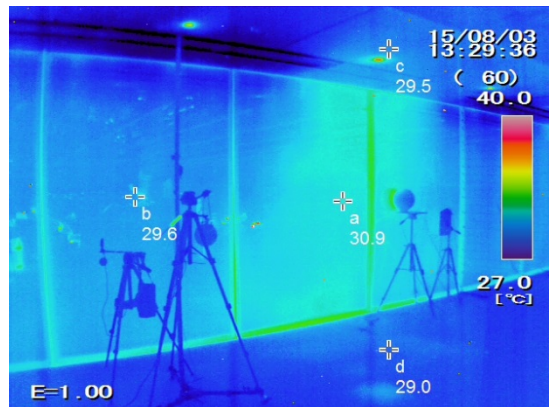
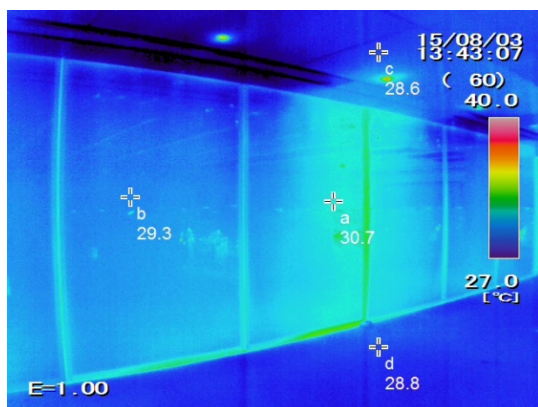
全閉 (スラット角 30°C一定)

クライマーブラインド自動制御

10:30



13:30



16:30

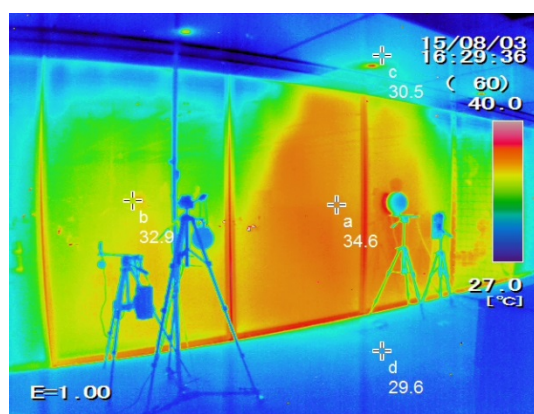
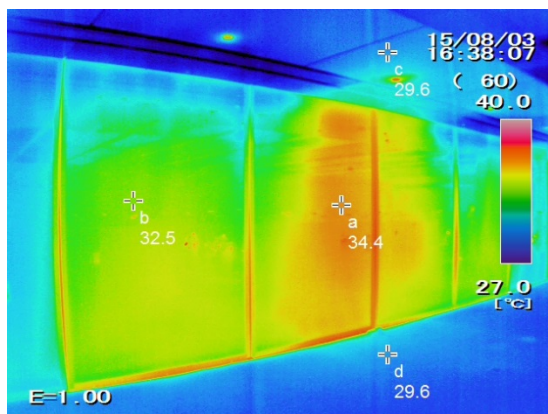


図4.11 窓面サーモ画像 (2015年8月3日撮影)

4.3 設定温度緩和効果

この項では「微気流あり」設定時における設定温度緩和の効果の検証結果を示す。26°C 設定は 8 月 4 日、27°C 設定は 7 月 31 日、28°C 設定は 7 月 30 日の結果を分析する。

4.3.1 システム性能と代表点温湿度

図 4.1 におんどとりにて測定した定常時(10 時～17 時)の空気状態をプロットした結果を示す・天井パネル裏側の空気温度は室温と同等であり、微気流吹出し空気は設定温度が高くなるほど、室温との温度差が大きくなり、絶対湿度差は小さくなることが確認された。27°C 設定の時、室温より約 0.23K 高く、デシカント給気の影響により湿度は約 0.0005kg/kg(DA)低くなり、エンタルピーは約 1.14kJ/kg(DA)低い。また、室温は設定温度±0.65K 以内となることが確認された。また 26°C、27°C 設定においてペリメータ室温はインテリア室温よりも約 1K 高かった。

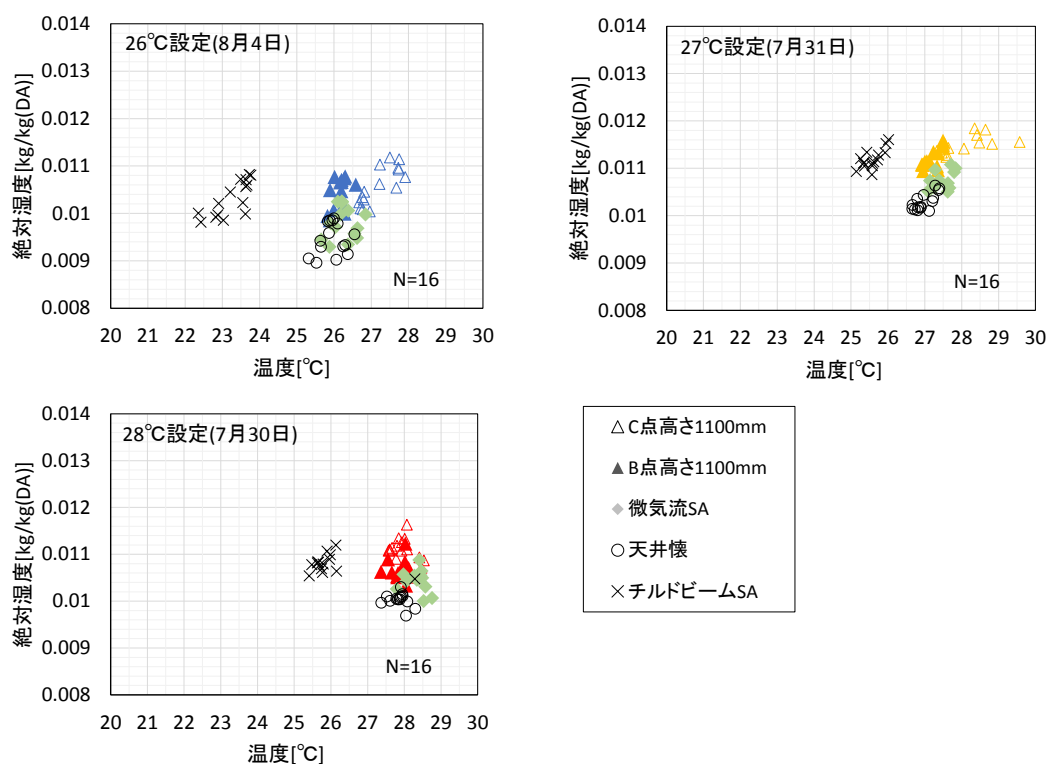


図4.12 吹き出し温湿度（2015 年入居前結果）

運用時における同様の結果を図 4.2 に示す。8 月 9 日の結果は西日の影響によりペリメータの室温に変動がみられるが、一日を通して 27.2°C～28.2°C の約 1K の変動であった。インテリア B 点は 26.6°C～27.3°C であり、ペリメータの影響は受けず、設定温度±約 0.4K の範囲におさまった。また、微気流と室温の温度差は 8 月 9 日が-0.03K であり、8 月 3 日は+0.3K であることから、パネルの通水時間が微気流吹き出し温度と室温の差に影響を及ぼすことが明らかとなった。

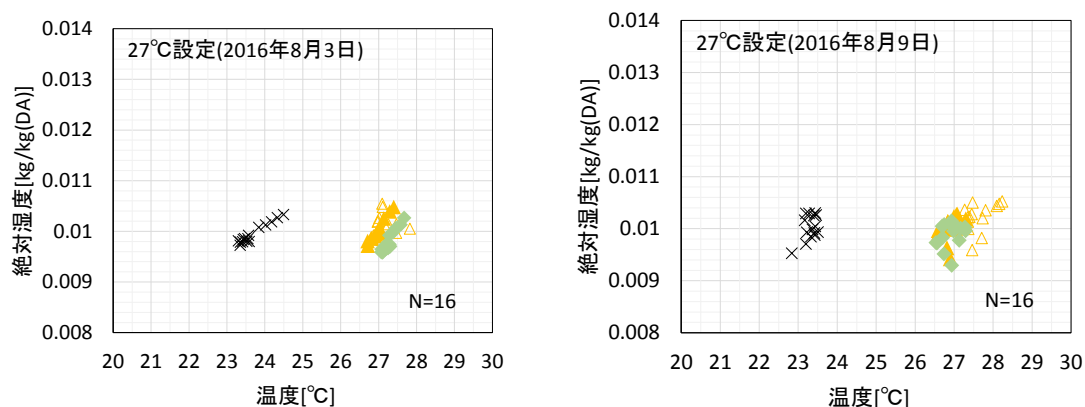


図4.13 吹き出し温湿度（2016年運用時結果）

図 4.14 に 2016 年 8 月 9 日に取得した、各測定点における温湿度 30 分平均値時系列データを示す各定常時平均値は、温度が A 点 26.4°C、B 点 26.9°C であり、湿度は A 点 46.3%、B 点 45.2%となった。どちらの測定点においても値は設定温湿度以下となっている。温度に差が見られた理由として、A 点はエレベータホールと階段が近く、在席密度が低いことが考えられる。また、等価温度は B 点 26.7°C

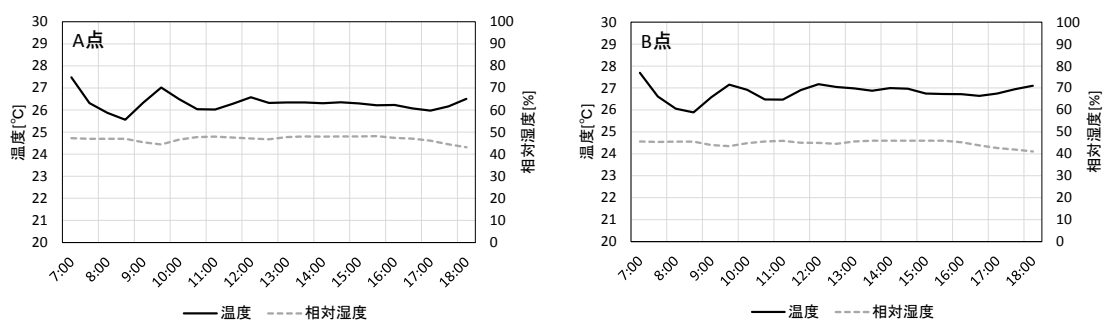


図4.14 測定点別時系列データ

4.3.2 上下温度分布

(1) インテリア

図 4.3 に入居前実測における設定温度別 11 時の 30 分平均上下温度分布を、図 4.4 に運用時実測における時間別 30 分平均上下温度分布を示す。2800mm はパネル表面温度を示し、7:00 は空調立ち上げ前の室内環境を示す。28°C 設定において足元の温度が低いことは前日の実験条件による影響が考えられるが、26°C、27°C 設定において居住域(100mm～1600mm)上下温度差は設定温度 0.5K 以内である。運用時の結果も時間問わず、居住域上下温度差は 8 月 3 日において 0.2K 以内、8 月 9 日において 0.11K 以内となった。結果から、熱負荷量によるパネル稼働時間に関わらず、上下温度差は小さく、天井放射空調の長所が Y ビルにおいても明らかとなった。

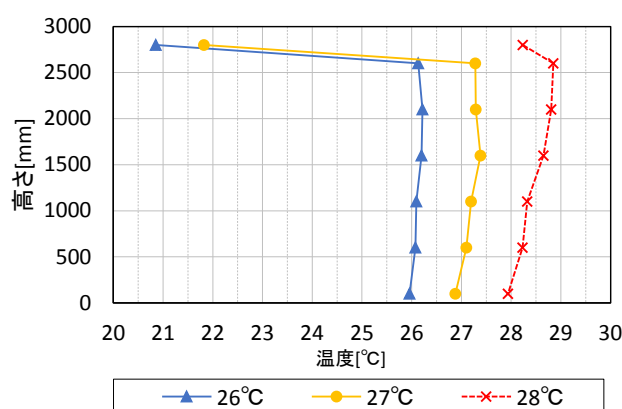


図4.15 上下温度分布（2015年入居前結果）

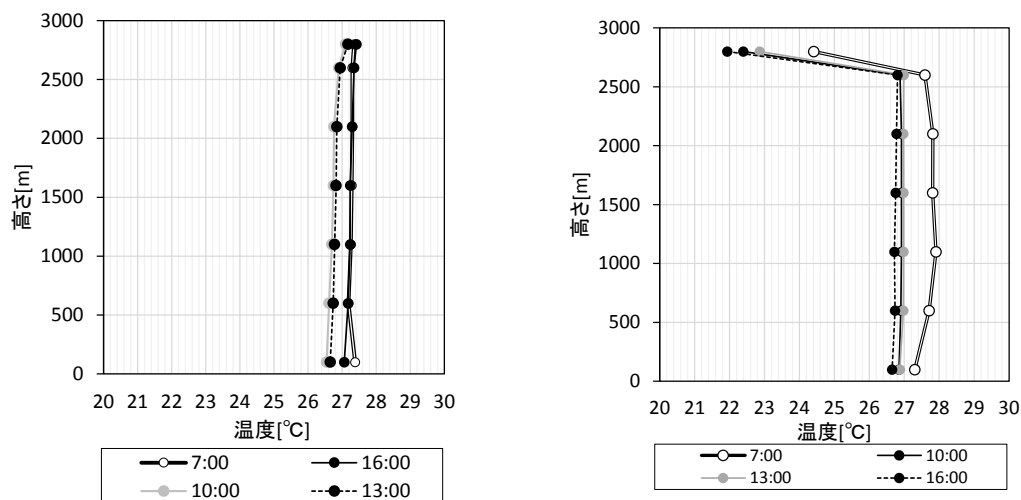


図4.16 上下温度分布（2016年運用時結果）

4.3.3 表面温度と MRT

表 4.4 に高さ 1100mm における形態係数を示す。形態係数は魚眼カメラにて撮影した画像を SPCONV ver0.7（画像データ射影方法変更プログラム）を用いて算出した。人体に対する形態係数を想定するため、6 面各々の面積比率を求めた後、上下 0.06%、側面 0.22%の係数をかけて算出を行った（ $0.06 \times 2 + 0.22 \times 4 = 1$ ）。パネルの天井敷設率は 54%でありダミーパネルが無いことから、6%の壁面に対して放射パネルが 28%と大きい範囲を占める結果となった。

表4.1 形態係数

パネル	天井	照明	窓	壁	床	家具
28%	6%	4%	3%	6%	22%	31%

図 4.5 に入居前実測における設定温度別温度変動域を示す。図はパネル表面温度、壁面表面温度、表面温度と形態係数から算出した MRT の定常時結果を示し、サンプル数は各々 420 である。ただし MRT は実測値と放射カメラより推定した値を用いて算出した。算出条件を表 4.5 に示す。結果から、どの設定温度においても MRT の変動域は小さく、1 日を通して安定した体感温度が得られることが明らかとなった。また、28℃ では立ち上げ時以外パネルが稼働しないため MRT 中央値が室温中央値よりも高くなったが、26℃、27℃ 設定において MRT 中央値は室温中央値よりも低くなり、冷却感が得られる執務空間が形成されていることが確認できた。

表4.2 MRT 算出条件

設定温度	パネル	天井	照明	窓	壁	床	家具
26℃	実測値	26	28.3	実測値	実測値	実測値	27.3
27℃		27	29.1				28.1
28℃		29.2	29.1				28.3

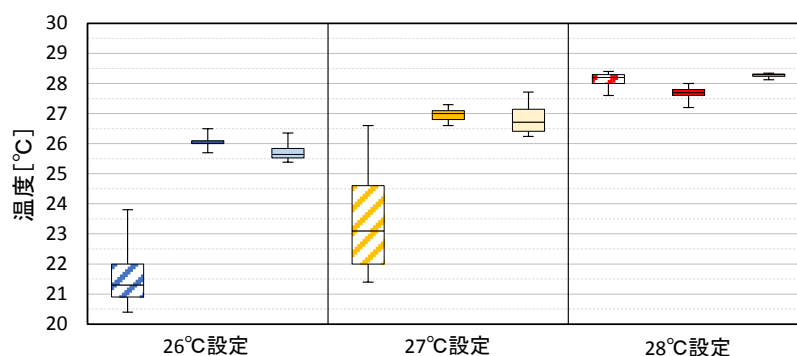


図4.17 入居前温度変動域

図 4.6 に運用時実測における温度変動域を示す。図は熱電対にて測定した表面温度、高さ 1100mm における室温、表面温度実測値と形態係数から求めた表面温度を示し、サンプル数は 420 である。稼働時間に関わりなく室温の四分位範囲は設定室温-0.3K 以内に収まり、MRT 四分位範囲は 0.35K 以内であることから、運用時も一日を通して安定した執務空間が形成されていることがわかった。また、放射パネルの影響を受ける壁や床、家具の表面温度中央値は全て室温±0.5K 以内であることが確認できる。8 月 3 日の結果はパネルが稼働しなかったことにより MRT 中央値は室温中央値より 0.36K 高い値となったが、8 月 9 日は 1.1K 低い値となり執務時間内のパネルの稼働は執務者が冷却感を得るために重要な因子となることが明らかとなった。

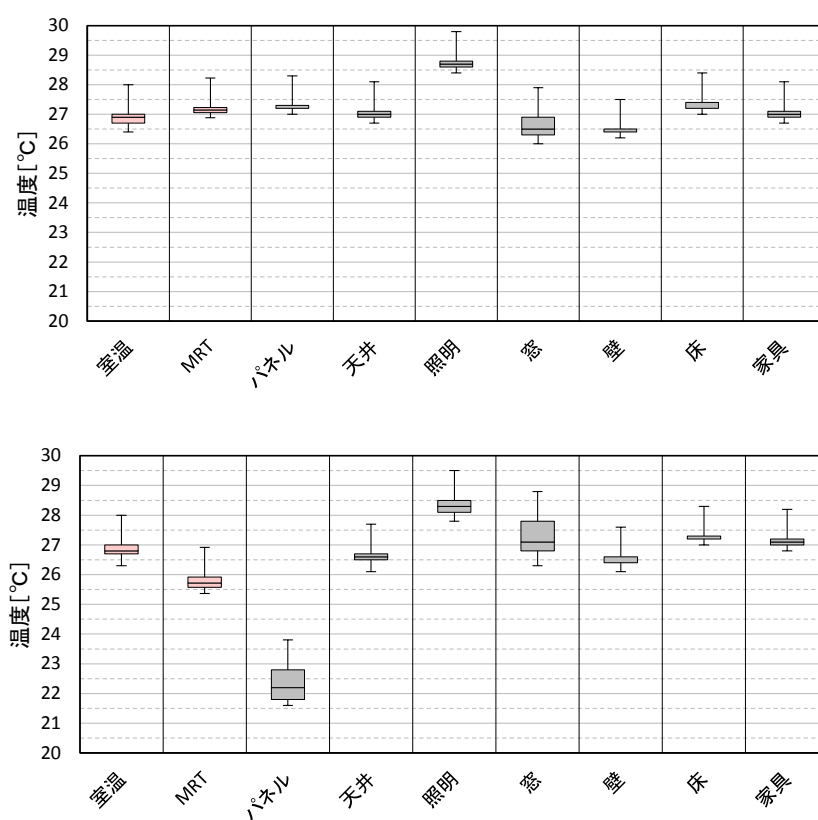


図4.18 運用時温度変動域

図 4.7 に 8 月 9 日に測定した各表面温度の時系列データを示す。結果から、日射やペリメータ吹き出し空気の影響を受ける窓や発熱をする照明以外の表面温度はパネルの表面温度の変動に追従して温度変動が起こることがわかる。この図からもパネルの放射熱は人体だけでなく室内のありとあらゆる壁面を冷却し、その壁面から二次的にも人体への冷却効果が出する、放射空調の効果が明らかとなった。

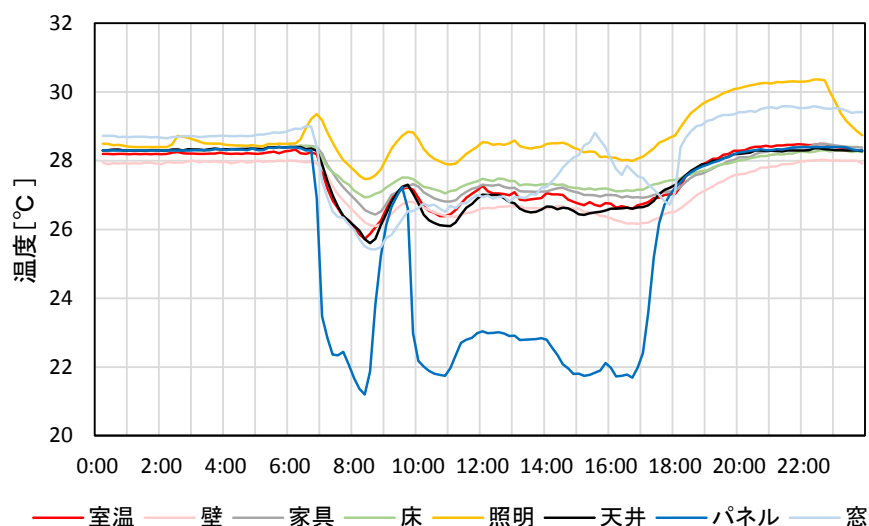


図4.19 各表面温度時系列データ

4.3.4 PMV

表 4.3、表 4.4 に 11 時の 30 分値を示す。PMV は着衣量 0.5clo、代謝量 1.1met を用いた。MRT は形態係数と表面温度より算出した値を用いている。入居前の測定より、27°C 設定においても PMV は 0.32 であるため、運用が可能であることが示唆された。表 4.4 の運用時の結果より、外気温が低く涼しい日は PMV が 0.52 であり、外気温が高く暑い日はパネル稼働時間が長く PMV は 0.1 程度となることから、暑い日程冷却感を感じる執務空間が形成されることが明らかとなった。

表4.3 2015 年入居前設定温湿度別 PMV

測定日	設定温度	パネル表面温度	室温	湿度	風速	MRT	PMV
8 月 4 日	26°C	20.9°C	26.1°C	47.3%	0.127m/s	25.0	-0.04
7 月 31 日	27°C	21.8°C	27.2°C	49.9%		25.9	0.32
7 月 30 日	28°C	28.2°C	28.3°C	45%		28.2	0.85

表4.4 2016 年運用時 PMV

測定日	設定温度	パネル表面温度	室温	湿度	風速	MRT	PMV
8 月 3 日	27°C	27.4°C	26.9°C	44.9%	0.108m/s	27.3	0.52
8 月 9 日	27°C	22.0°C	26.5°C	46.0%	0.125m/s	25.5	0.10

4.4 微気流の効果

4.4.1 定点風速分布

図 4.8 に定常時風速 10 分平均値を示す。「微気流あり」は 8 月 4 日の結果を、「微気流無し」は 8 月 1 日の結果を用いた。「微気流無し」で 0.1m/s 程度で概ね一定であった風速が「微気流あり」において 0.1m/s～0.18m/s の間で変動することが確認でき、モックアップ実験で最適とされた中風速 0.17m/s に近い気流速度となることが明らかとなった。

図 4.9 に運用時の風速出現頻度を示す。測定間隔 0.01 秒の三次元風速計の結果のうち定常時のデータを使用したため、サンプル数は 252000 個である。中央値は約 0.12m/s であるが、0.02m/s から 0.24m/s にかけてなだらかな山型の分布を描く揺らぎが運用時にも発生していることがわかる。

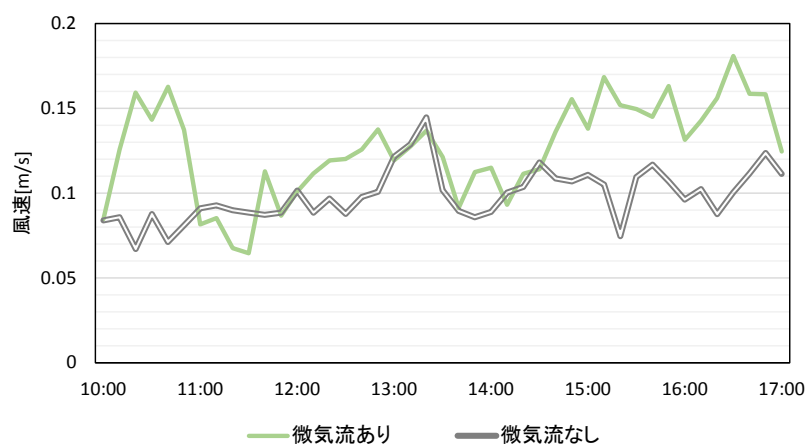


図4.20 風速平均値トレンド

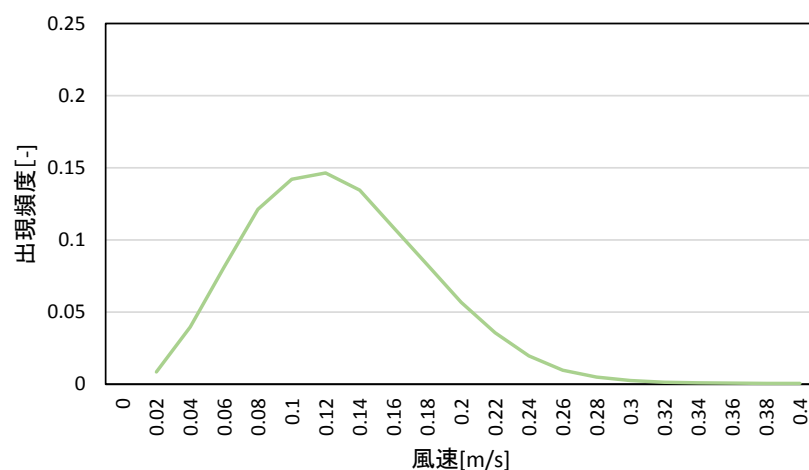


図4.21 風速出現頻度

4.4.2 断面風速分布

図 4.10 に熱線風速計にて手動測定した断面風速分布を、図 4.11 に多点風速計にて測定した上下風速分布を示す。図 4.10 は「微気流なし」「微気流あり」どちらも 27°C 設定における風速分布となる。図 4.11 は 2016 年に測定したデータの 1 時間平均値である。結果から、居住域空間どの高さにおいても高さ 1100mm にて測定した結果と同じ値となることがわかった。

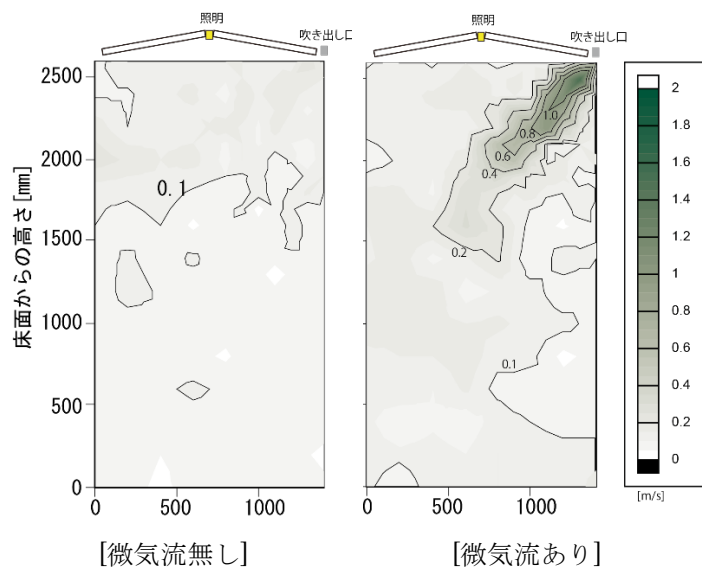


図4.22 断面風速分布

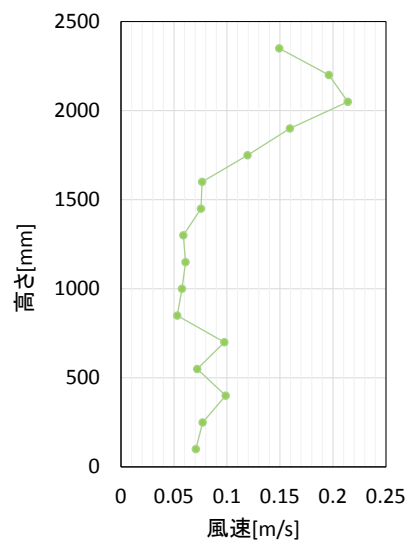


図4.23 上下風速分布

4.4.3 可視化実験

レーザーによる気流可視化実験を8月4日に実施した結果を図4.9に示す。「微気流あり」ではパネル付近にて発生した冷気は気流により居住域空間に運ばれ、その後も気流により混合され続ける。よって冷気がよどむことなく対流し続けることが確認された。「微気流なし」ではパネル付近にて発生した冷気が時間をかけてゆっくりと居住域空間に落ちてくる様子が確認された。しかし「微気流なし」では冷気が攪拌されることなく居住域空間に溜まり続けることが明らかとなった。

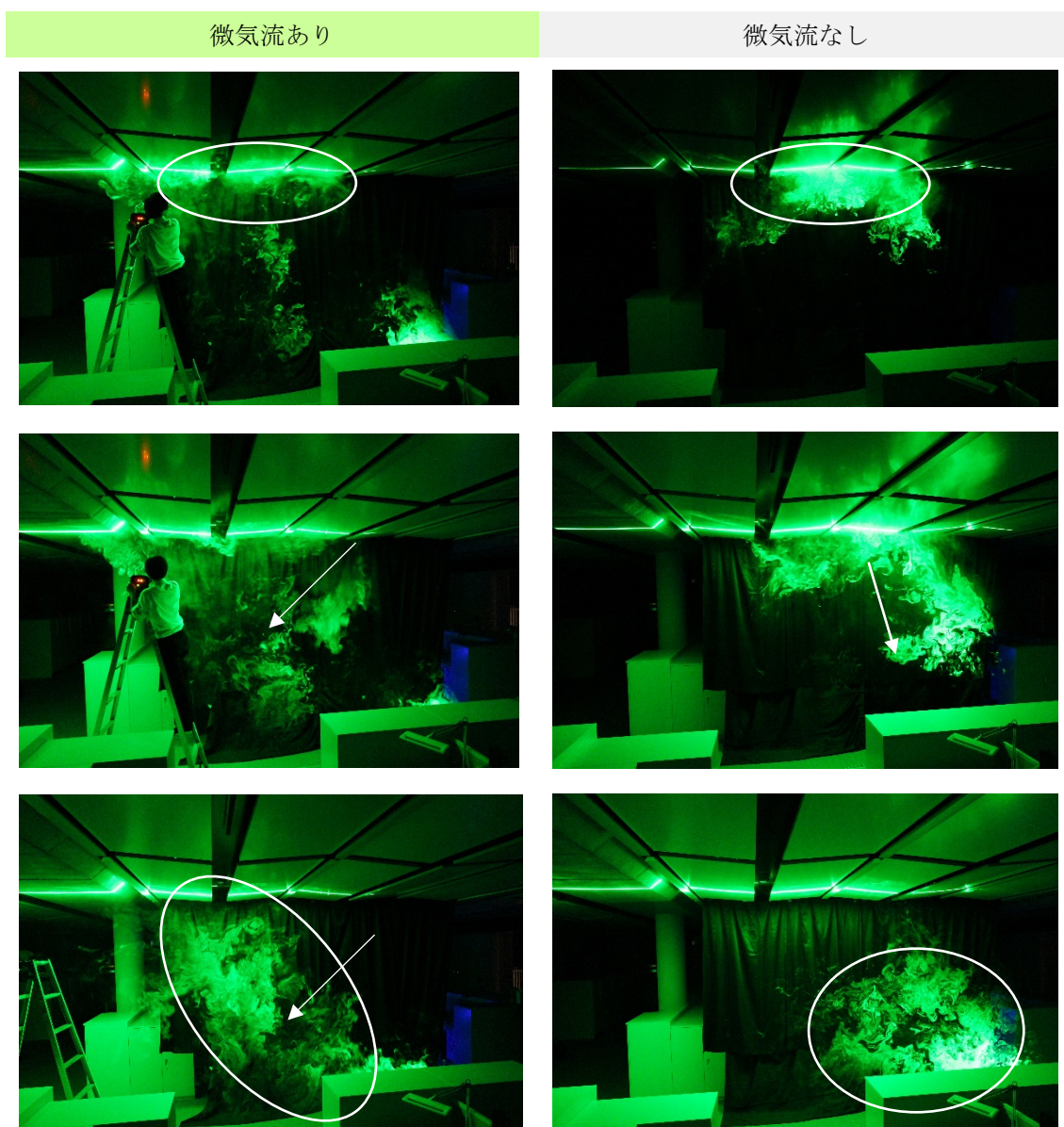
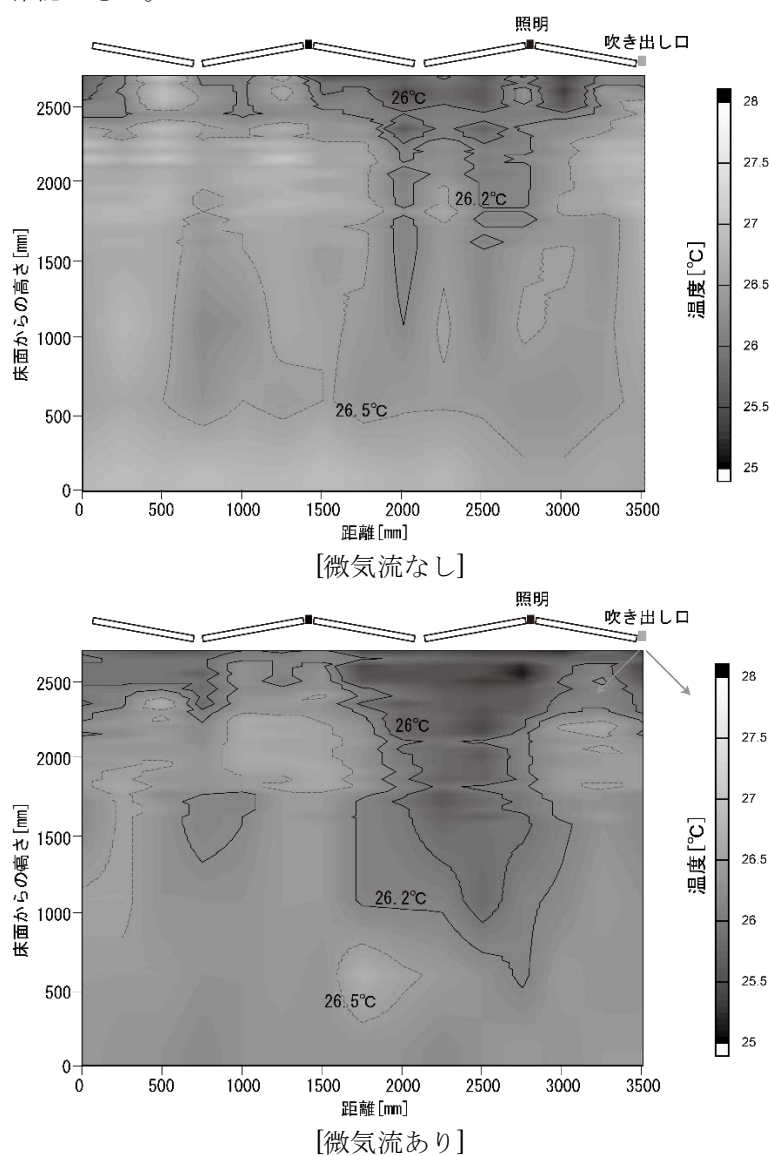


図4.24 レーザーによる気流可視化実験

4.4.4 温熱環境断面分布

図 4.13 に移動計測器にて測定した「微気流無し」「微気流あり」における 27°C 設定における断面温度分布を示す。どちらも 15 時半に測定したデータとなる。微気流無しの「微気流無し」でも雁行したパネルの隙間から冷気が垂れ下がることが確認でき、設計趣旨が温熱環境に反映されたことがわかる。そこに気流を付加することによって天井付近に滞留した冷気の流れを促進し、「微気流無し」のケースと比較して温度の低い執務空間が形成された。結果から放射空調を対流併用型にすることの有用性が明らかとなった。また、図 4.14 に同様の条件にて測定した設定温度が 26°C、28°C の時の結果を示す。結果から、照明周りの温度がパネル付近で上がるものの、居住域には影響を及ぼしていないこと、また、微気流の効果は設定温度に関わらず明らかであることが確認できた。



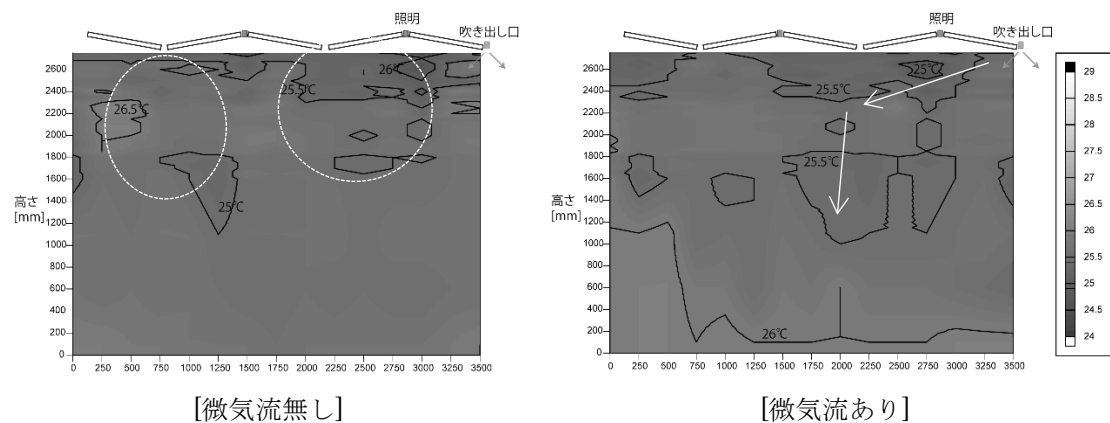


図4.26 断面温度分布（26°C 設定）

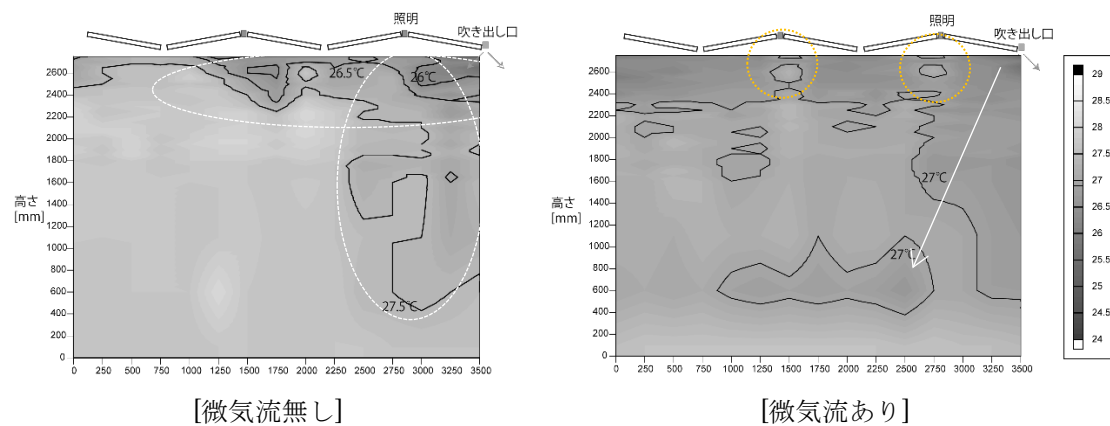


図4.27 断面温度分布（28°C 設定）

4.4.5 サーマルマネキン結果

図 4.19 に運用時に測定を行ったサーマルマネキンの発熱量と室温の関係を示した散布図を示す。クールビズ着用のため裸体となった前腕部の熱損失量が小さいことがわかる。また、室温と発熱量は線形比例をする。微気流を付加することで、裸体である前腕部において熱損失量が大きくなる結果が表れた。よって、着衣の軽装化と微気流の併用効果が確認できた。

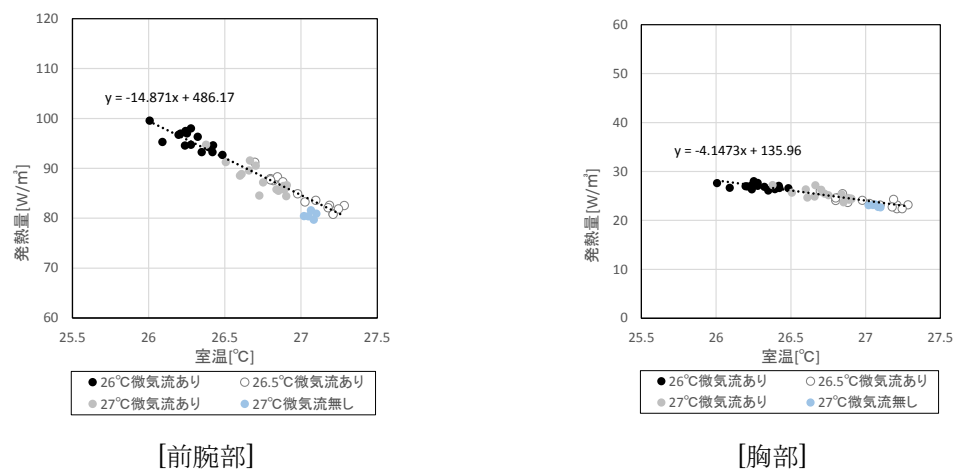


図4.28 サーマルマネキンの発熱量と室温の関係性

4.5 パネル単体性能試験

2016 年に取得した 8 月 9 日の放射パネルの各表面温度測定結果を図 4.20 パネル表面温度の 1 分値を、表 4.3 にその平均値に示す。

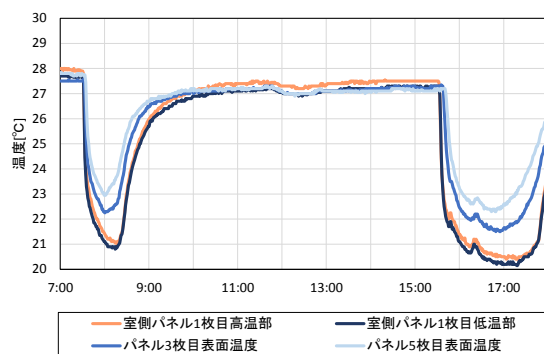


図4.29 パネル中央表面温度

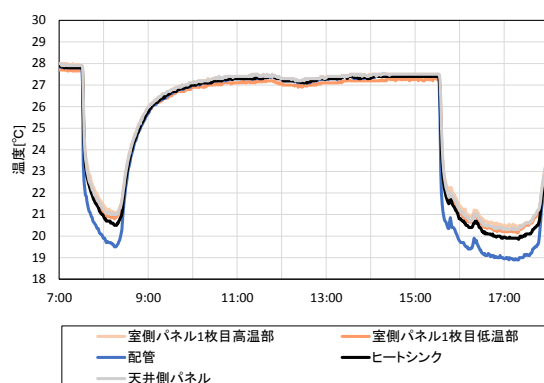


図4.30 熱流計測定点表面温度

表4.5 パネル表面温度平均値

	パネル表面温度 平均値[°C]		1枚当たり の温度差[K]
	1枚目	5枚目	
立ち上げ 8:00	21.07	23.04	0.40
定常時 14:00	27.20	27.10	-0.02

表4.6 熱流計測定点表面温度平均値

	室側平均値[°C]	
	低温部	高温部
立ち上げ 8:00	21.07	21.38
定常時 14:00	27.2	27.47

	天井側平均値[°C]		
	配管	ヒート シンク	パネル
立ち上げ 8:00	19.89	20.86	21.12
定常時 14:00	27.37	27.36	27.47

図 4.22 に 8 月 9 日に取得した放射・対流熱束の時系列データを示す。パネルに通水された 15 時半から 17 時半の間の熱流束比率は一定の比率を保ち、値も安定していることが確認できる。この時間内(16 時から 17 時半)の放射対流熱流束の平均値を図 4.23 の積み上げグラフに示す。熱量は天井側合計が 35.6W/m^2 、室内側合計が 77.3W/m^2 であり、天井側は放射 47%、対流 53%、室内側は放射 45%、対流 55%となった。図 4.24 に立ち上げ後の 8 時から 9 時の通水の停止に伴うパネル表面温度の上昇と熱流量の減衰のプロットを示す。結果から、通水停止時も同様の比率でなだらかに減衰することが確認された。

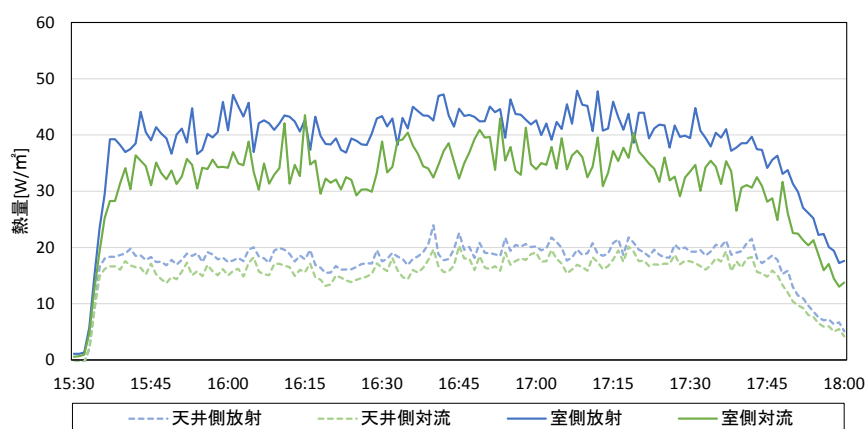


図4.31 放射・対流熱流束の時系列データ

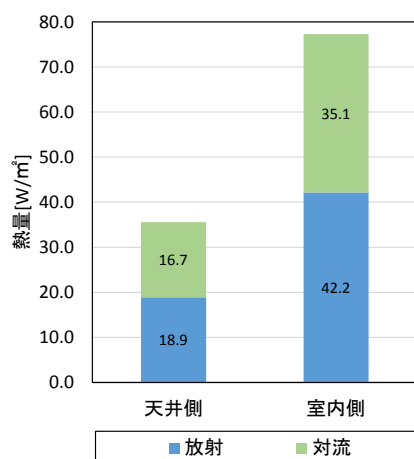


図4.32 放射・対流熱流束

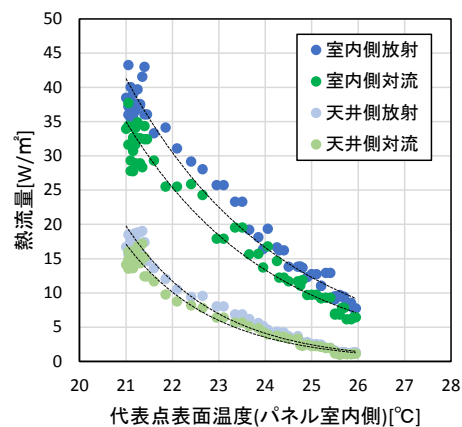


図4.33 表面温度と熱流束の相関図

4.6 アンケート調査結果

4.6.1 基本情報

アンケート回答者は 85 名であり、体調を不調と回答した 2 名を除いた 83 名の回答で分析を行った。図 4.34、図 4.35 にアンケート対象者の年齢構成と性別構成を示す。30 代が 42%、40 代が 34%を占め、うち約 42%が女性である。また、自己申告結果は暑がり側の回答が 48%、寒がり側の回答が 32%であった。女性は寒がりと暑がりがほぼ同数であり男性は暑いが多い傾向となった。

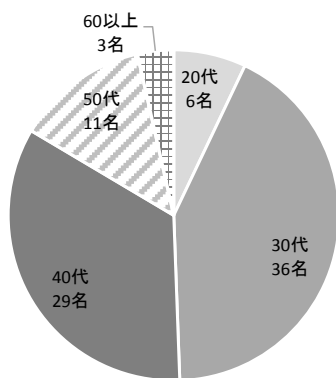


図4.34 年齢構成

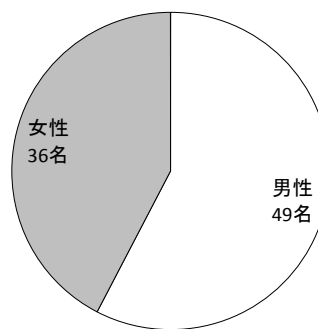


図4.35 性別構成

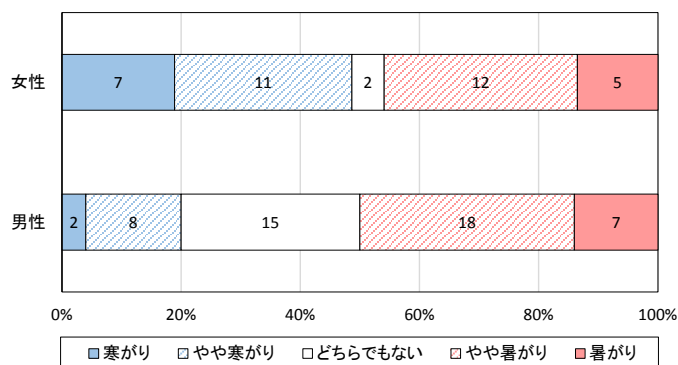


図4.36 自己申告調査

4.6.2 温冷感と湿度感

図 4.37 に部位別温冷感申告結果を示す。申告は連続尺度を用いたため、ISO7730 の推奨値である $PMV \pm 0.5$ を参考に 7 段階評価に分類した。結果は足元から頭部まで温冷感申告傾向の差が小さいため、放射空調の特徴である上下温度分布の均一性を執務者が感じていること、気流による局所的な冷却感が無いことが確認できる。また、全身温冷感に関して、暑い側の申告が 19%、寒い側の申告が 35%であったため、 27°C 設定でも十分に涼しいと感じることができる環境であることがわかる。

図 4.38 に男女別温冷感申告と着衣量を示す。着衣量は ISO9920 を参考に算出を行った。申告平均値は女性が約-0.39、男性は約+0.24 であり、女性の申告結果は着衣量との相関性があるが、男性は個人差が大きいことが明らかである。男性のクールビズ率は 63%であり、18 名が長袖を着用していたため着衣量が大きい。このような傾向から図 4.39 に示す通り、袖の長さ別の申告結果を分析したが、長袖を着用している人はどちらでもないと回答した執務者が 66%を占めた。一方で半袖を着用している人は温冷感申告結果にばらつきが見られた。よって、袖の長さが「暑い」側の申告につながる理由でなかったことが明らかとなった。

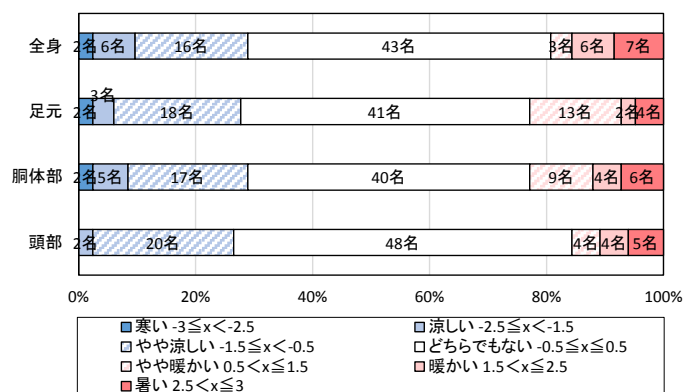


図4.37 部位別温冷感

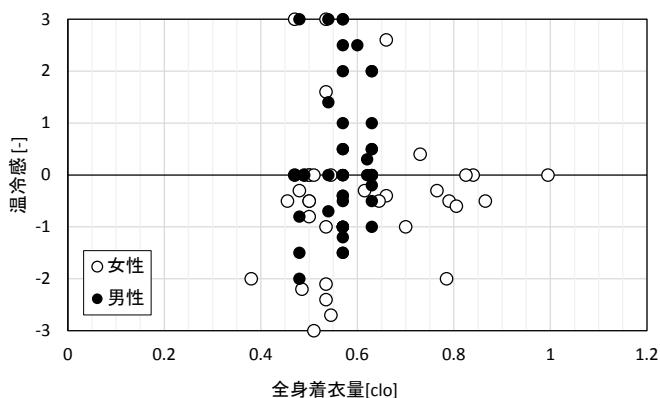


図4.38 男女別温冷感と着衣量

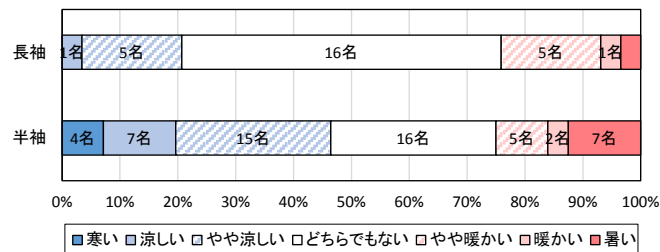


図4.39 そでの長さと言冷感

図 4.40 に場所別温冷感申告の結果を示す。パーセンテージは在籍人数における男性の人数を示す。ペリメータに近いゾーンにて暑いという回答が多いことがわかり、インテリア 2 ゾーンにてある側の回答は 12%(3 名)のみであった。暑い側の回答はペリメータに近い北西ゾーンに多く見られた。南西側は大規模商業ビルが首都高を挟んで建っており、北西側は通りが開けている、このことから日射の影響が暑いという申告の原因として考えられるため、ペリメータの運用調整が重要である。

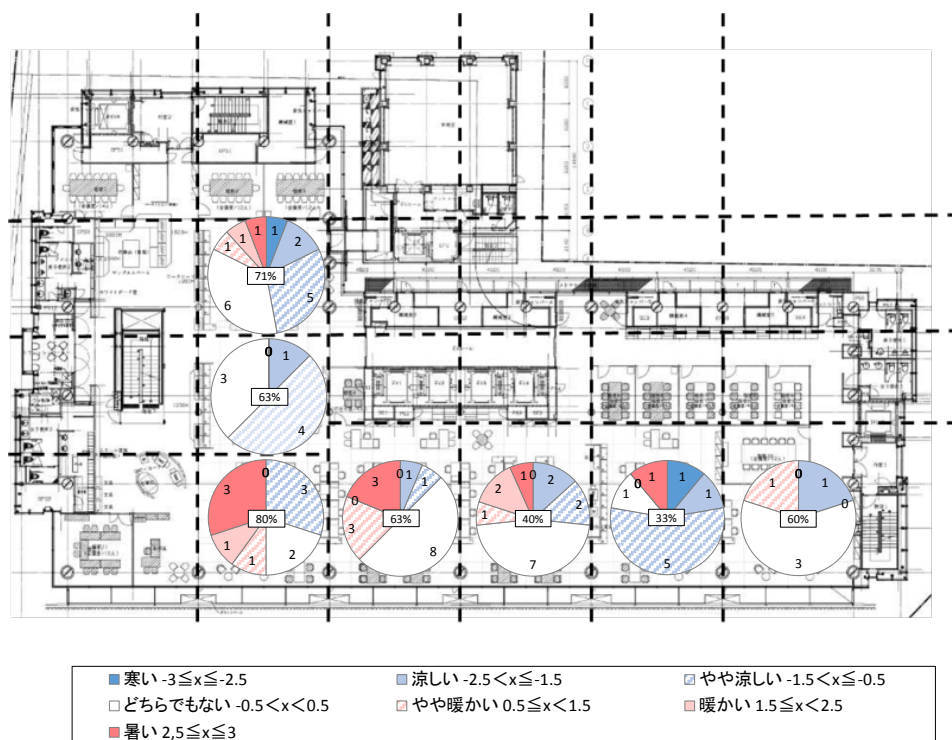


図4.40 場所別温冷感

図 4.41 に湿度感申告結果を示す。乾いている側の申告と湿っている側の申告結果がほぼ同数であり、ちょうどよいという回答が 65%を占めたことから、デシカント空調の運用は執務者の主観的感觉においても適切であることが確認できた。

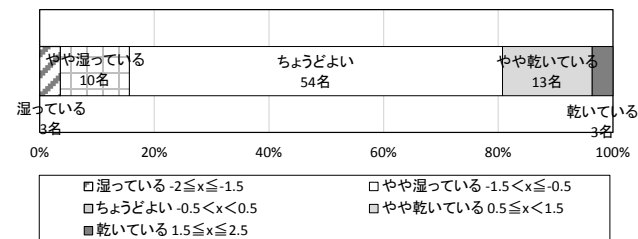


図4.41 湿度感

4.6.3 気流感

図 4.42 に気流快適度と執務空間快適度の相関図を示す。図より気流の快適度は執務空間の評価に相関することがわかる。また、図 4.43 に示す気流感は「感じる」が 3 名「やや感じる」が 22 名「どちらかといえば感じる」が 17 名「感じない」が 39 名であり、感じる側に回答した人は 51.9%であった。図 4.44、図 4.45 に感じる側に回答した人に調査した、気流感別の気流の強さと気流温度に関する結果を示す。気流強さ±0.5 以内回答は 63.%, 気流温度±0.5 以内回答は 78%を占めたため、室温と同程度の温度で 0.1~0.18m/s の変動域をもつ微気流は温度・強さ共に適切であることが示された。

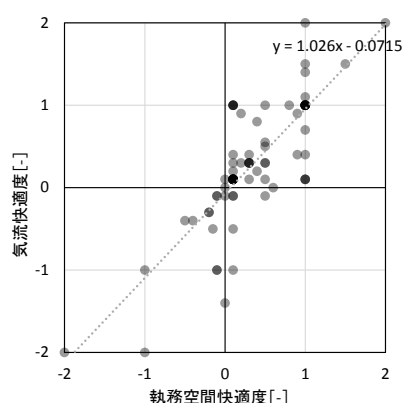


図4.42 気流快適性と室内快適性

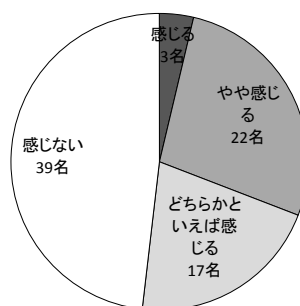


図4.43 気流感

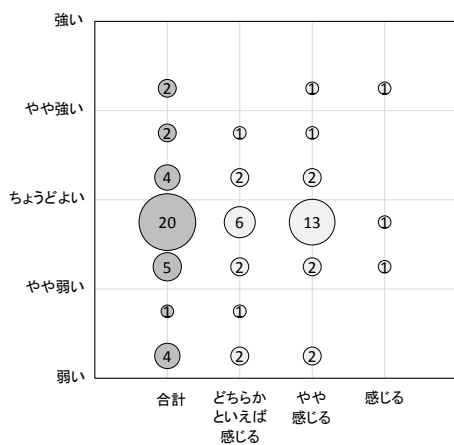


図4.44 気流の強さ

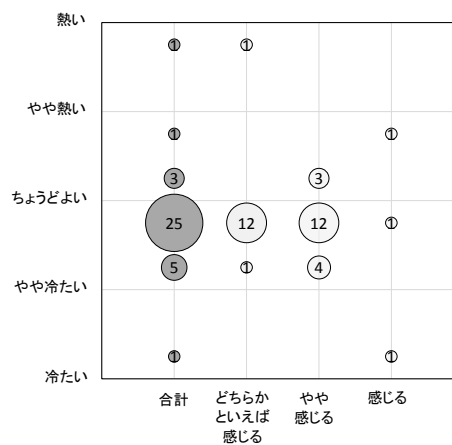


図4.45 気流の温度

4.6.4 総合評価

快適度、受容度、満足度の調査は-0と+0の途切れた連続尺度を用いた。図4.48に申告結果を示す。プラス側の回答が快適率、受容率、満足率とすると、各々74%、83%、74%となった。満足側の回答が得られた理由を図4.47に示す。執務者1人から回答が2つ以上得られた場合はどちらも数に含んだ。結果、放射空調の特徴が78%を占めたが適切な気流の付加も満足感を与える要因となることがわかった。

図4.48に知的生産性の自己申告結果と快適感との関係性を示す。快適性と知的生産性の自己申告結果は相関することが明らかであるが、図4.49に示す全身温冷感と快適性の散布図にはばらつきが見られた。快適度申告が±0付近でも、温冷感申告は-3から+3まで回答があり、温冷感申告値には個人差があることがうかがえる。しかし、-1以下の回答は暑い側のみ+1以上の回答は寒い側のみで出現したことから冷却感執務者に快適感を与えることが明らかとなった。

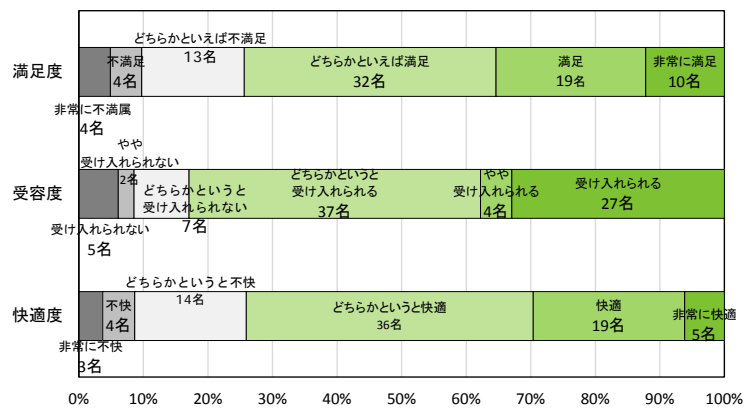


図4.46 満足度・受容度・快適度の申告

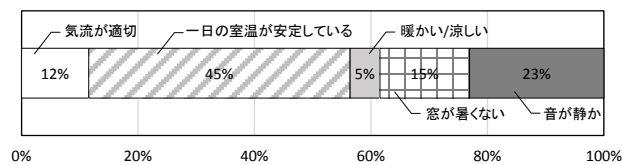


図4.47 以前在籍していたオフィスと比較して満足した理由

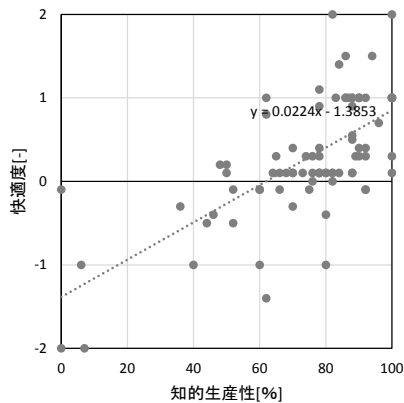


図4.48 知的生産性の自己申告

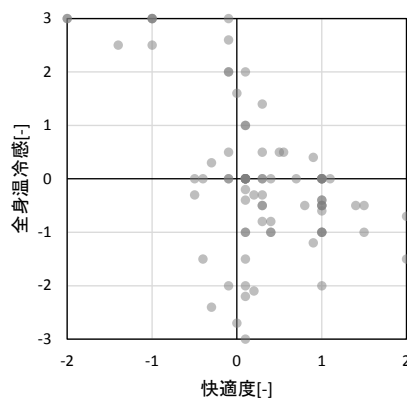


図4.49 温冷感と快適感

4.7 微気流による快適範囲の拡大

2014 年に行ったモックアップ実験室を用いた被験者実験結果の分析を再度行うことで微気流による快適範囲拡大効果に関して考察を行った。実測手法と分析に用いた測定パターンは第 2 章に記す通りである。

4.7.1 分析に用いた実験条件

実測値との設定温湿度中央値の誤差を図 4.50、図 4.51 に示す。誤差は 0.5K や 3%以内に収まっているケースも多いが、温度差 1K や相対湿度差 5%を超えるケースも出現したため、分析は室内設定条件のパターンではなく実測値を基に行うこととした。このように設定値との誤差が発生したのはモックアップ実験室のため断熱が足りなかったことが原因の 1 つとして考えられる。図 4.52 に実測値における乾球温度中央値と作用温度中央値の差を示す。この結果より、乾球温度から作用温度を引いた値がマイナス 1K 以上となった 1a は、人体の発熱等の影響によるグローブ温度異常値とみなし、分析に使用しなかった。

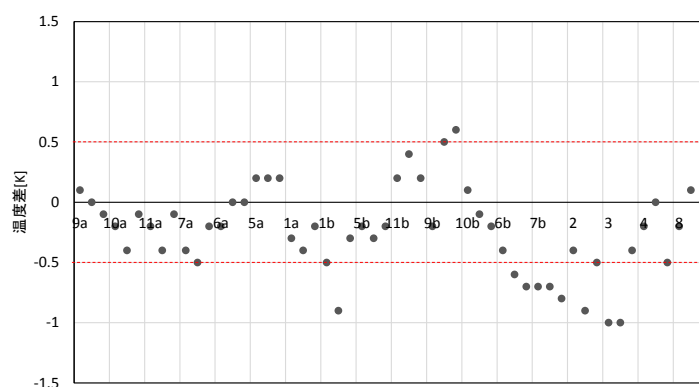


図4.50 設定温度と乾球温度実測値の差

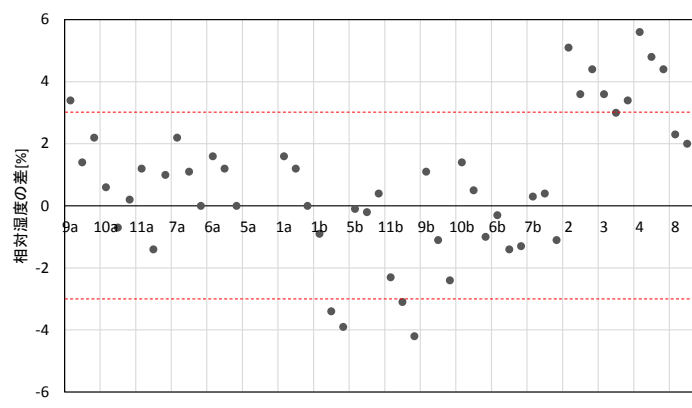


図4.51 設定湿度と相対湿度実測値の差

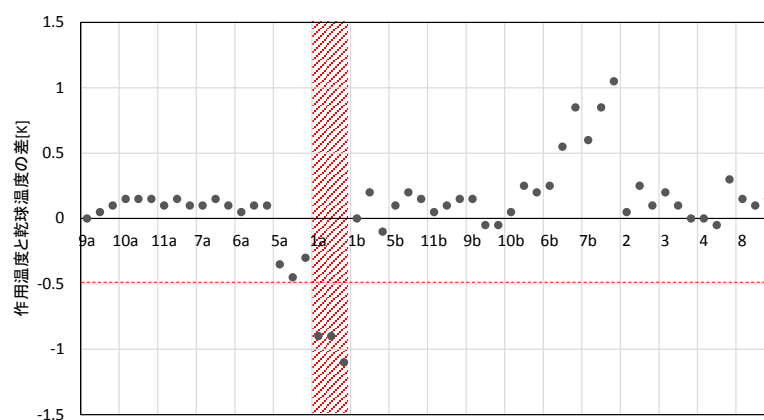


図4.52 実測値における作用温度と乾球温度の差

4.7.2 分析結果

結果を表 4.7 に示す。快適度は既報を参考に被験者の中에서도気流を感じると回答したものの中で分析を行った。

表 4.7 実測中央値及び被験者数と結果

温度 [°C]	作用温度 [°C]	絶対湿度 [kg/kg(DA)]	男性 [人]	女性 [人]	快適度 [%]
26.9	26.7	0.010356	3	1	100
27	27.05	0.013433	3	2	50
28.2	27.35	0.013348	2	3	100
27.5	27.4	0.011813	5	1	100
27.6	27.5	0.01205	3	3	75
28.1	27.55	0.010102	2	3	33.3
28.1		0.01161	2	3	66.7
27.8	27.6	0.010498	3	1	100
27.9	27.65	0.011473	6	0	50
27.3	27.75	0.012813	3	2	66.7
27.9	27.8	0.00989	3	2	100
28	27.85	0.012072	5	1	75
28		0.01336	5	1	100
28	27.9	0.012607	6	0	100
28	27.95	0.011009	5	0	100
28.4	28.25	0.011992	1	4	100
28.4		0.013059	1	4	0

図 4.53 に被験者実験結果を空気線図上にプロットし、快適度 75%以上が見込まれるゾーンに着色をした「快適範囲」を示す。各パターンにおける温湿度も共にプロットを行った。青◇が階程度 75%以上であった条件を、赤△が空き適度 75%未満であった条件を、灰色×は範囲を決定する際に用いなかった条件を示す。図より、微気流を併用することで設定室温を 26°C から緩和しても執務者は快適であると感じる可能性があることが示唆された。絶対湿度約 0.013kg/kg(DA)以上または約 0.0105kg/kg(DA)となると不快者回答率が増加することも、快適度 75%未満の回答傾向をみると推測できる。この結果より、微気流には設定温度緩和効果は大きいものの、設定湿度緩和効果は小さく、皮膚表面温度に冷涼感を与える効果が強いと考察できる。よって図から微気流併用型放射空調により執務者快適性を向上させる運用は、設定温度を 27°C または 28°C 緩和し、絶対湿度は 0.0105kg/kg(DA)以上 0.013kg/kg(DA)未満に制御することを提案できる。

図 4.54 に図 4.53 の快適範囲と ASHRAE の快適範囲を示した空気線図上に 2015 年に行った夏季入居前検証にて測定した高さ 1100mm における定常時 1 分値をプロットした散布図を示す。図より、27°C 設定でも微気流による冷却感による快適範囲拡大効果により快適性は保たれるということが示唆される。以上の結果と運用時アンケート調査結果からも快適度 75%以上であることが示されたことから、快適範囲拡大効果が明らかとなった。

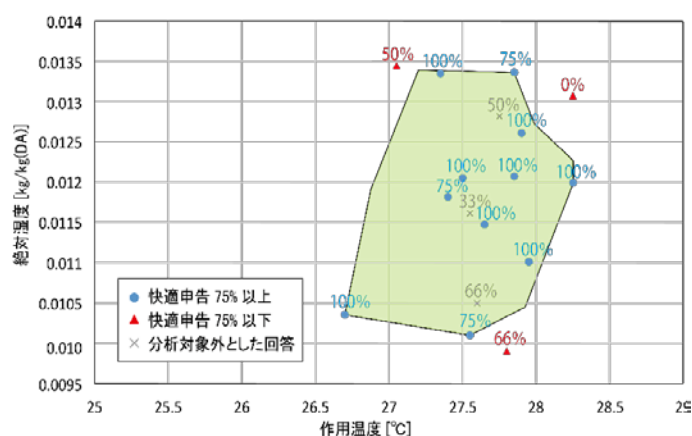


図4.53 被験者実験結果に基づく快適範囲の検討

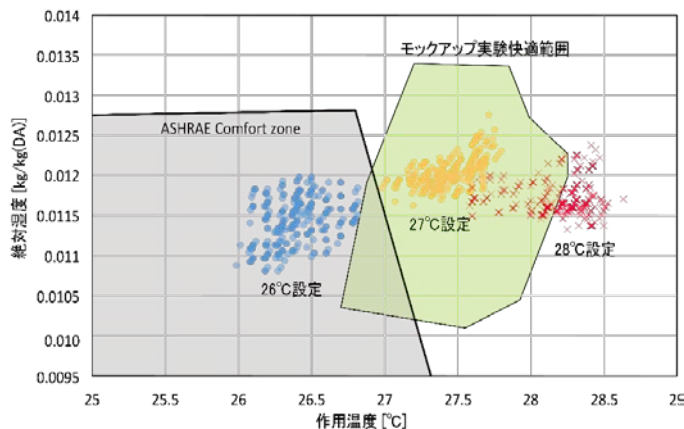


図4.54 快適範囲と実測値の散布図

4.8 まとめ

2015 年入居前に行った空調設定条件別温熱環境実測と、2016 年運用 1 年目にて行った 27°C 設定における温熱環境実測及びアンケート調査から以下の知見が得られた。ただし 27°C 設定における運用とする。

1. ペリメータ温熱環境

- ・ チルドビームの風向はインテリアにむけて吹き出す気流と、窓表面に沿って吹き出す気流がある。窓に沿って吹き出す冷風により熱の流入を効果的に排除し、窓表面温度は 32°C～34°C 程度に抑えられている。
- ・ ペリメータ温熱環境は午後に西日の影響を受けるものの、その変動は 1K 以内におさえられており、上下温度差も 0.8K 以内である。また高さ 1100mm における風速は 0.2m/s 程度である。
- ・ クライマースラインドにより眺望性を損なわず、効果的に日射制御を行うことが、ブラインド全閉時との窓近傍の床面や天井面表面温度の比較により明らかになった。

2. インテリア温熱環境

- ・ 放射パネルとデシカント空調機により天井上側で温湿度調整されて吹き出す微気流の吹き出し温度は室温と同程度であり、吹き出し温度から室温を除いた値は 0.03K から 0.3K 程度である。またデシカント空調の影響でエンタルピは室温よりも 1.14kJ/kg(DA)程度低い。
- ・ 27°C 設定に緩和することでパネルの稼働時間が減り、パネル表面温度の変動域は大きくなる。しかし、上下温度差は時間に問わず 0.11K 以内であり、定常時における MRT 四分位範囲も 0.35K であることから設定温度緩和により室内環境は悪くなることないことが明らかとなった。
- ・ 「微気流なし」では 0.1m/s 程度で概ね一定であった風速が「微気流あり」にすることで、中央値は約 0.12m/s で 0.02m/s から 0.24m/s までの変動微風が発生することが確認された。
- ・ 微気流を併用することで、パネル付近に滞留している冷気の流れを促進し、一般放射空調と比較して温度の低い執務空間が形成できることが明らかとなった。
- ・ 放射率の異なる 2 枚の熱流計を用いて放射成分と対流成分を各々求める測定方法は、放射パネル能力を実測する際に有用であることが明らかとなった。ただし、この測定方法を採用する場合、使用機器は半導体で作られたものなど、精度のよいものでないとならないことも明らかとなった。

3. アンケート調査結果

- ・ アンケート回答者は 85 名であり、30 代が 42%、40 代が 34%を占め、うち約 42%が女性であった。
- ・ 温冷感申告結果は部位別の差異が無く、暑い側と寒い側の回答数の差が小さかったことから、執務者の主観的評価に基づく結果においても 27°C 設定は適切であることがわかった。
- ・ 場所別温冷感申告結果から、放射空調を行う際のペリメータ空調の運用調整が重要である

ことがわかった。

- ・ 0.1m/s～0.18m/s 程度の変動微風は「感じない」と回答した人が 48.1%であり、Y ビルにおいても既往研究と同等の結果が得られることが明らかとなった。
- ・ 気流を感じる側に回答した執務者のアンケート結果より、気流温度・気流強さとも適切であることが確認できた。
- ・ 総合評価は快適率 74%、受容率 83%、満足率 74%であり、適切な執務環境となっていることがわかる。また、温冷感申告は快適感申告に直接的に影響するのではなく、個人差も大きいことがわかった。

4. 微気流による快適範囲の拡大に関する考察

- ・ 施工フェーズに行ったモックアップ実験結果を再度分析を行ったことで、微気流による ASHRAE の快適範囲から外れた温湿度条件における快適範囲の拡大効果が示唆された。
- ・ 絶対湿度約 0.013kg/kg(DA)以上または約 0.0105kg/kg(DA)となると温度に問わず、不快者回答率が増加することが確認された。よって、微気流は設定温度緩和効果が大きいものの、設定湿度緩和効果は小さく、皮膚表面温度に冷涼感を与える効果が強いと考察できる。
- ・ 27°C 設定の運用値は ASHRAE の快適範囲からは外れるものの、被験者実験による拡大範囲には収まっており、実際に執務者アンケート調査結果からもかいてきであることが示唆された。

5 章 冬季暖房検証結果

5 冬季暖房検証結果

5.1 はじめに

冬季暖房検証は既述の通り 2016 年 1 月 30 日から同 2 月 7 日と、2017 年 1 月 7 日から 1 月 21 日に行った。どちらも運用時の検証となり、2016 年に取得した温熱環境データとアンケート調査結果より 2017 年に運用改善を行っている。

この章では 2016 年に行った運用時検証結果を分析する。項の構成は以下の通りである。4.2 に実測条件として、検証期間中の外界気象条件、ペリメータ温熱環境実測結果を示す。4.3 温熱環境実測結果、4.4 アンケート調査結果を示す。夏季実測と同様に定量的評価と主観的評価の二面から天井放射暖房に関して検証を行った。

5.2 実測条件

5.2.1 気象条件

実測期間中の気象条件を示す。2月1日は雨天であったため日射量が小さく、最高気温は6.7°Cであった。一方、2月5日は快晴の時間が多く、最高気温は13.3°Cであった。平日5日間の平均湿度は54%、平均最高気温は9.88°Cである。近い値を示した2月4日のデータを分析の対象とした。

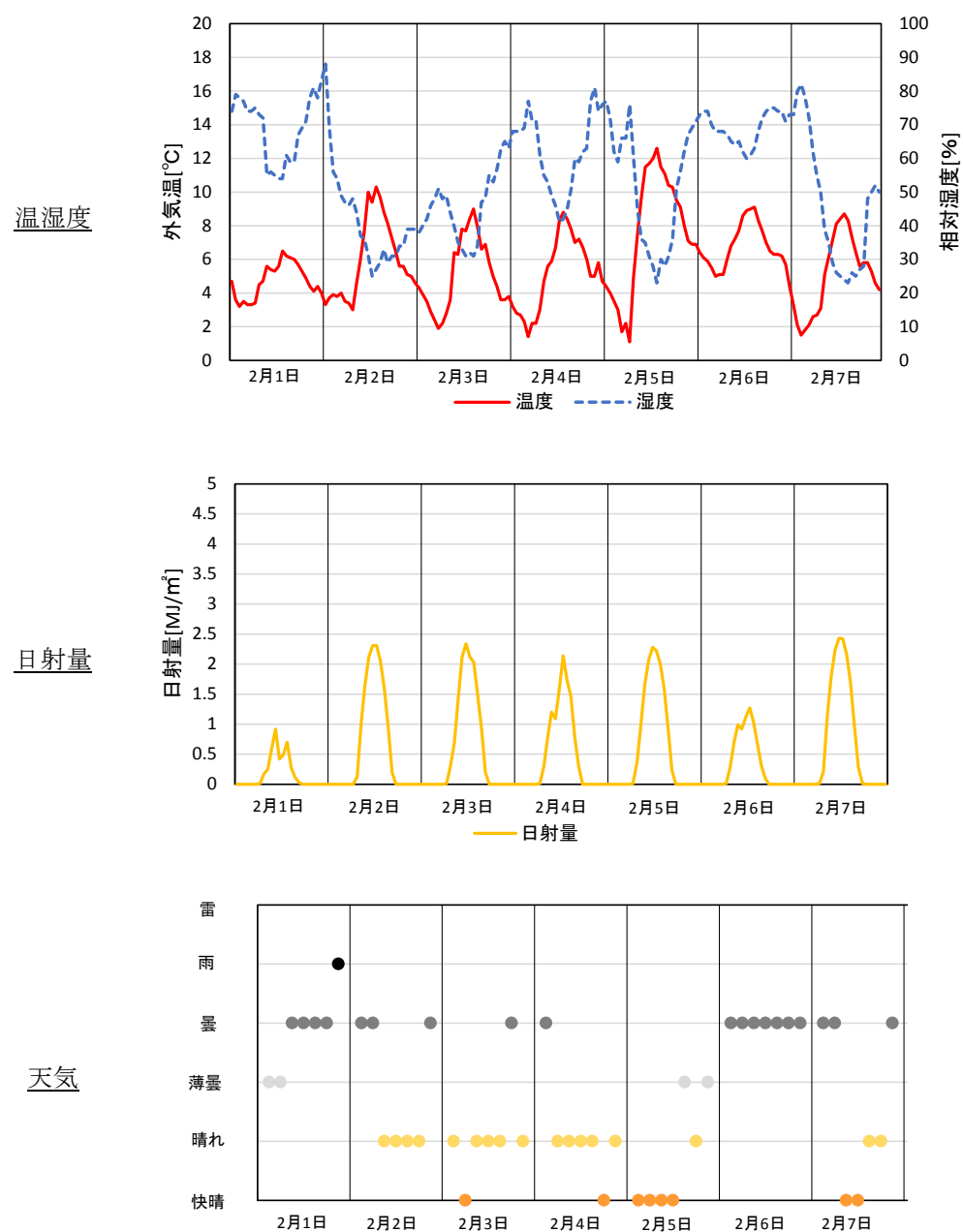


図5.1 気象状況（2015年7月29日～同8月4日）

5.2.2 ペリメータ条件

5.2.2.1 温熱環境

図 5.3 に 2 月 4 日に取得したペリメータ空調システムの吹き出し・吸い込み温湿度の時系列データを示す。吹き出し空気温度は立ち上げから正午までは 27°C から 30°C 程度であったが、午後は室温と同程度となっているため空調が停止していることが予想される。また、空調運転時間内の天井内吸い込み口の温湿度は室内よりも低かった。

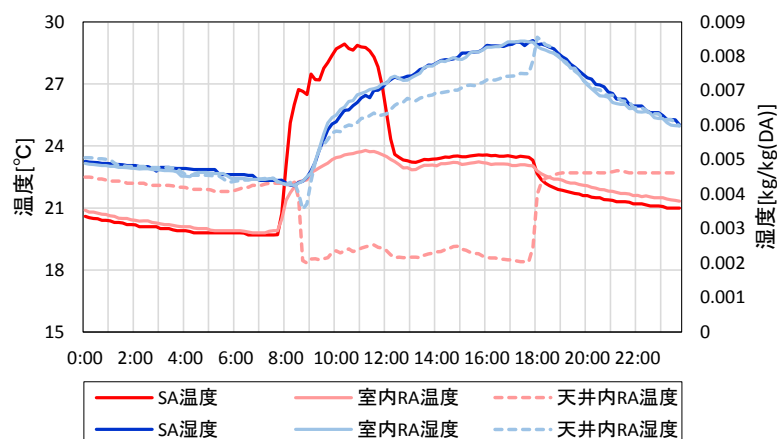


図5.2 ペリメータ空調吹き出し吸い込み温湿度

図 5.3 に 2 月 4 日におんどとりにて測定した時系列データを示す。ペリメータ温度は立ち上げから 1 時間程度で設定温度に到達し、定常時の平均値は 23.0°C となった。空調が停止したことにより徐々に温度は低下しているものの、設定温度を下回ることにはなかった。

図 5.4 に 2 月 7 日に測定した上下温度分布を示す。熱電対の平日データが欠損したため、休日取得したデータにて置換している。測定した上下温度分布を示す。13 時と 16 時に大きな差は見られず居住域上下温差は 1.2K 程度となった。

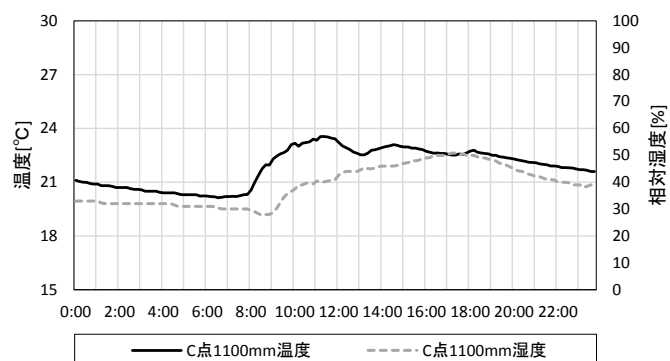


図5.3 ペリメータ時系列温熱環境データ

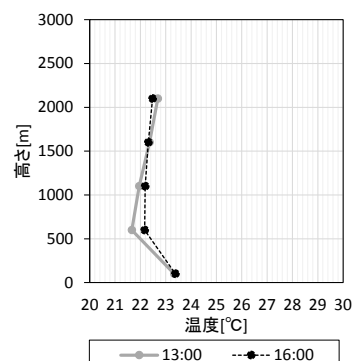


図5.4 上下温度分布

図 5.5 に移動計測機器にて手動測定を行った結果を示す。窓に沿って吹き出す風の影響で、窓近傍においてもインテリア室温と同等に暖められており、効果的に熱負荷を除去できていることがわかる。また、室内側に吹き出す風が断面温度分布からも確認された。

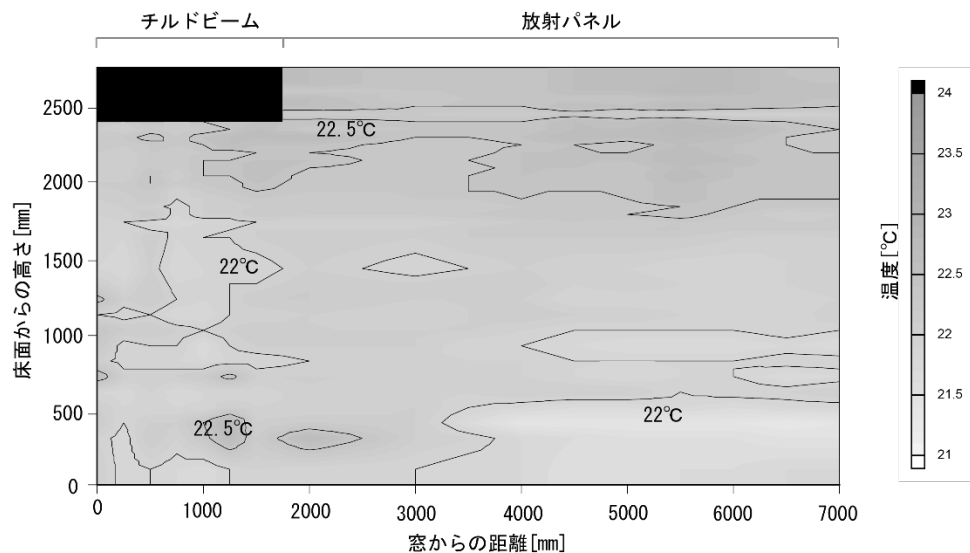


図5.5 ペリメータ温熱環境断面分布

5.2.2.2 風速分布

図 5.6 に 2 月 4 日の高さ 1100mm における風速の時系列データを示す。14 時付近で発生した異常値を除いた定常時の平均値は 0.093m/s であり、チルドビームによる強い気流は発生しておらず、執務者は夏と同等の気流感を感じることが確認された。

図 5.7 に風速断面分布を示す。夏季と同様に窓面に向かって吹き出す気流とインテリア方向へ吹き出す気流が確認できたが、暖房運用で風温が室温よりも高いため、床に沿って流れた気流が上昇する様子が見られた。

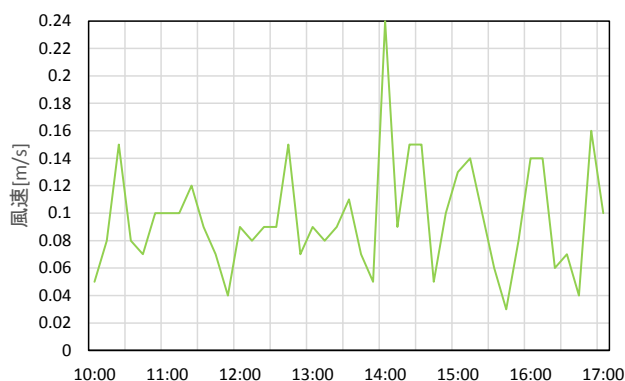


図5.6 風速 10 分平均の時系列データ

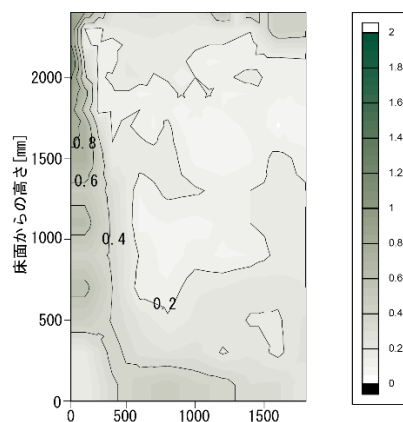


図5.7 風速断面分布

5.2.2.3 熱画像

図 5.8 に 2 月 7 日に放射カメラにて撮影した熱画像を示す。画像より、チルドビームの暖風により窓表面温度も時間に関わらず室温と同程度の 20°C に保たれることでまどからの冷放射も最低限に抑えることができていることが明らかとなった。

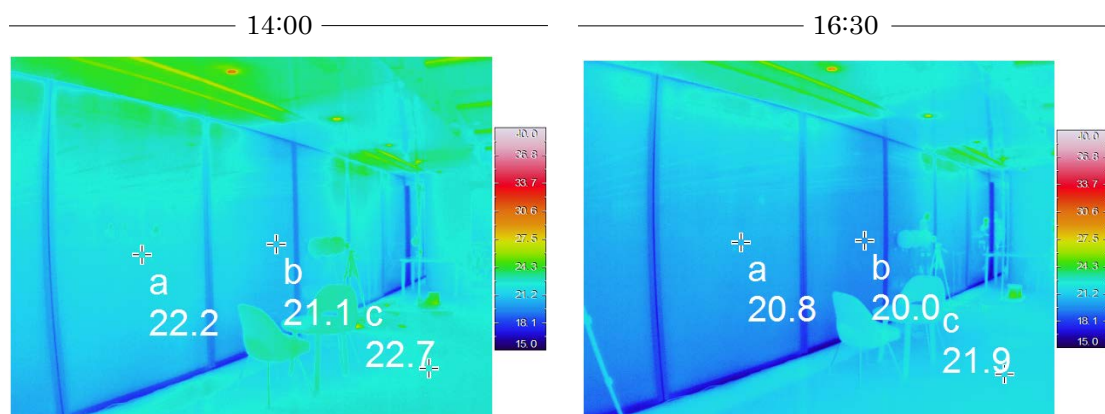


図5.8 ペリメータ表面温度

5.3 温熱環境

代表日として 2 月 4 日のデータにて分析を行う。

5.3.1 システム性能と代表点温湿度

図 5.8 におんどとりにて測定した定常時(10 時～17 時)の空気状態をプロットした結果を示す。暖房時はパネルの稼働が立ち上げ時のみであったため、天井内の平均空気温度は 18.8°C となり室温約 23°C よりも 4.2K 程度低くなる傾向が見られた。

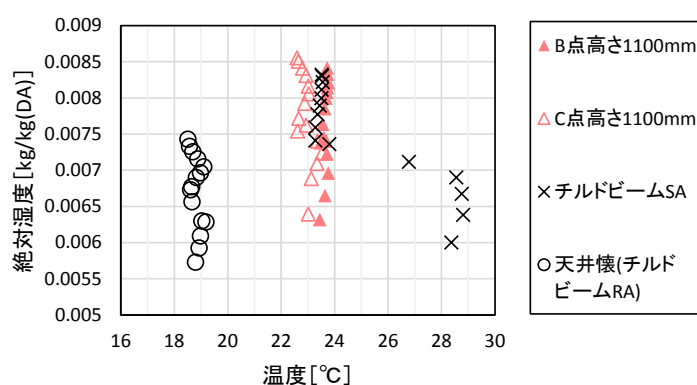


図5.9 吹き出し温湿度 (2015 年入居前結果)

また、図 5.10 にインテリア空調システムの吹き出し・吸い込み温湿度を示す。デシカント空調機に追従して高さ 1100mm における湿度も上昇している様子が確認できる。立ち上げ直後に吹き出し温度は上昇し、概ね 24°C で吹き出している。

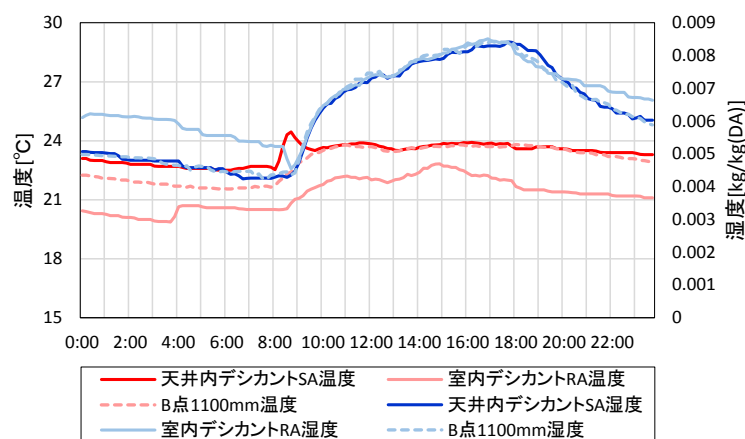


図5.10 インテリア空調吹き出し・吸い込み温湿度

図 5.11 に各測定点における温湿度 30 分平均値時系列データを示す。各定常時平均値は、温度

が A 点 23.0°C、B 点 23.4°C であり、湿度は A 点 44.0%、B 点 41.2% となった。どちらの測定点においても値は設定温度以上となっている。夏季と同様に温度に若干の差が見られものの、インテリア空間の平面温度差は 0.5K 以下であると言える。また、相対湿度は執務時間中、ゆるやかに上昇し続ける傾向がみられた。

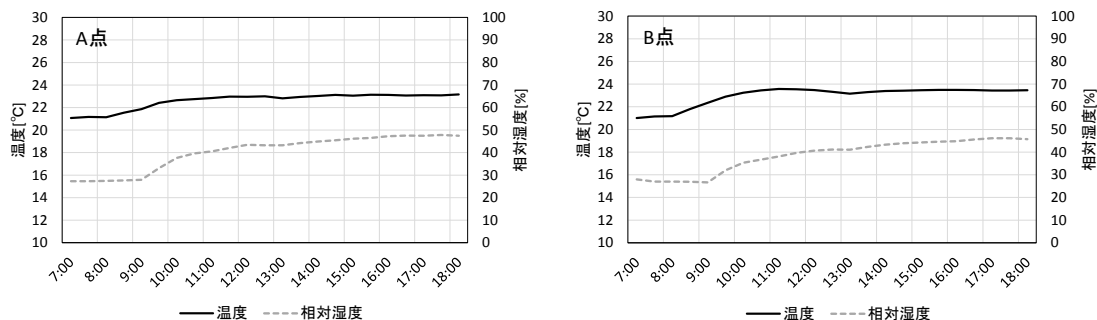


図5.11 測定点別時系列データ

5.3.2 上下温度分布

(1) インテリア

図 5.12 に時間別 30 分平均上下温度分布を示す。2800mm はパネル表面温度を示し、7:00 は空調立ち上げ前の室内環境を示す。B 点に比べ A 点の上下温度差が大きいことが確認されたが、立ち上げ前の 7 時の時点で足元の温度が低くなっていることから、A 点においても空調運転により上下温度差を緩和できていることが確認できる。13 時時点の居住域空間の上下温度差は A 点で 0.88K、B 点で 0.27K となった。

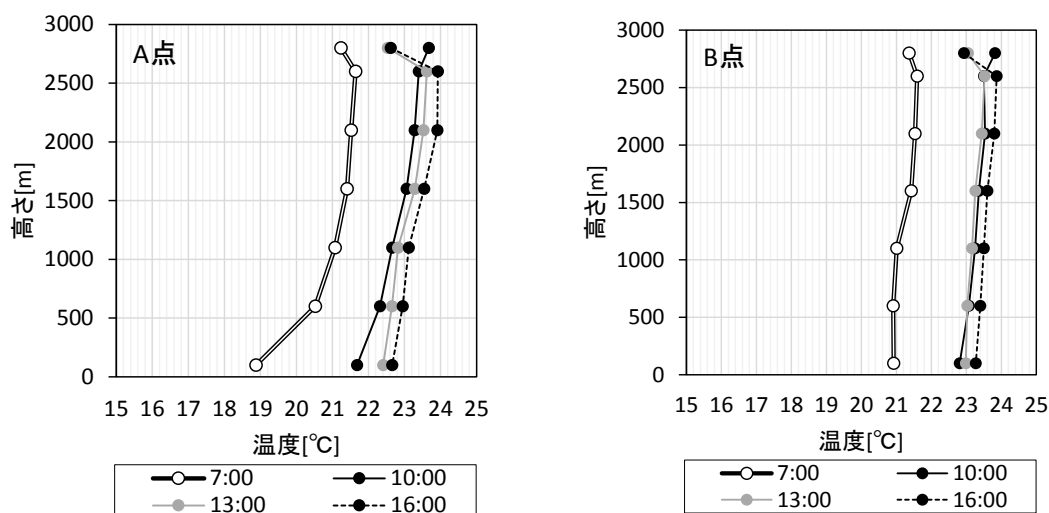


図5.12 上下温度分布（2016 年運用時結果）

5.3.3 表面温度と MRT

図 5.13 に温度変動域を示す。図はパネル各表面温度実測値と形態係数から算出した MRT の定常時結果を示す。ただしパネル表面温度のみ欠損したため BEMS データにて置換をした。定常時のサンプル数は 420、立ち上げ時のサンプル数は 8 時から 10 時の 120 とした。立ち上げ時はパネル通水が行われてから定常状態に向かうまで温度変動が確認される。定常時はパネルに通水されていないため、パネル表面温度の四分位範囲は 22.9°C から 23.3°C となり、壁面は 23°C 一定となった。このことにより、室温、MRT とともに一日を通して安定した室内温熱環境が形成された。各四分位範囲は室温が 23.3°C から 23.5°C、MRT が 23.5°C から 23.6°C である。立ち上げ時に暖められた各表面温度の影響で MRT は室温と同等となった。

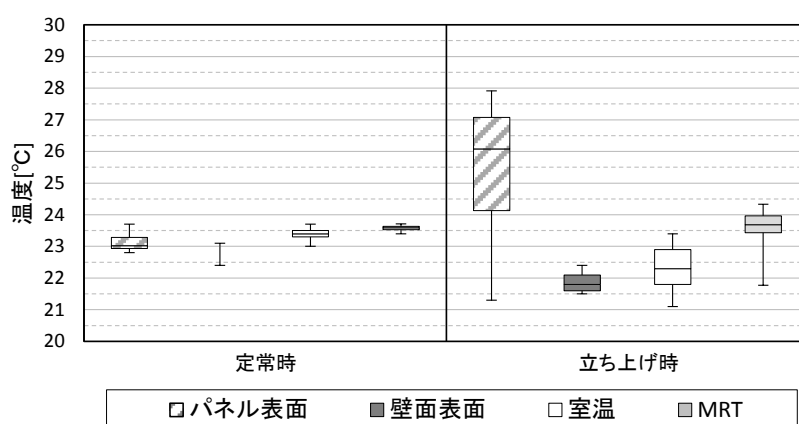


図5.13 冬季温度変動域

図 5.14 に各表面温度の時系列データを示す。パネル表面温度は 8 時から 10 時まで変動が見られ、定常時は緩やかな温度低下をする。一方で形態係数の 65% を占める壁、床、天井、家具はパネルの通水とともに表面温度が 2K 程度上がり、執務時間中は下がることなく、1 日を通して安定した室温を形成した。窓表面温度はペリメータの吹き出し空気に依存していることも確認された。

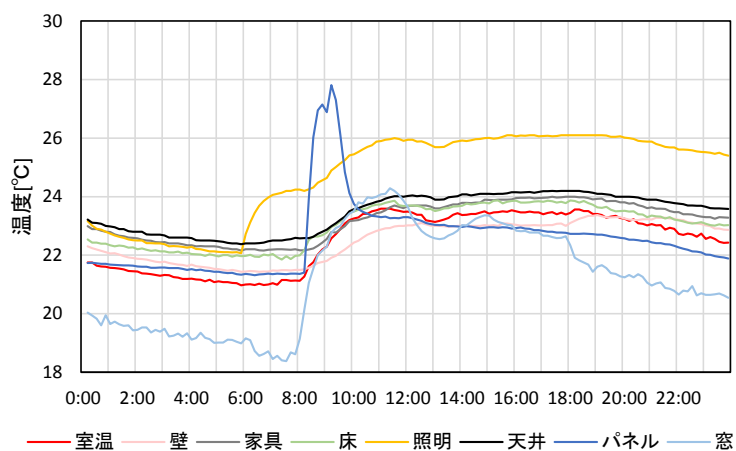


図5.14 各表面温度時系列データ

図 5.15 に手動測定にて撮影した熱画像を示す。立ち上げ時のパネル最高温度は約 30.7℃であり、5 枚目は約 27℃であった。また、画像よりパネルに通水されていない定常時でも家具表面温度も室温と同程度に暖められていることが確認できる。

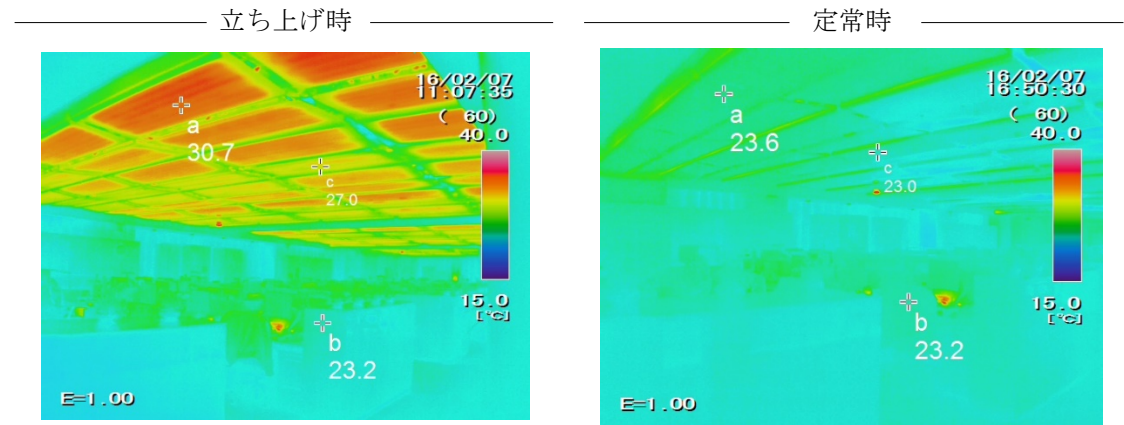


図5.15 熱画像

5.3.4 PMV

表 5.1 に立ち上げ時と定常時の代表時間における 30 分平均値を示す。ただし PMV は着衣量 1.0clo、代謝量 1.1met を用いた。MRT は形態係数と表面温度より算出した値を用いている。PMV は立ち上げ時は 0.05 であり定常時は 0.15 となり、±0.5 以内となった。

表5.1 PMV

測定日	設定温度	パネル表面温度	室温	湿度	風速	MRT	PMV
立ち上げ時 9:00	22℃	27.3℃	22.4℃	26.7%	0.076m/s	24.01	0.05
定常時 11:00	22℃	23.3℃	23.6℃	38.1%	0.12m/s	23.6	0.15

5.3.5 温熱環境断面分布

図 5.16、図 5.17 に移動計測機器にて測定した断面温度分布を示す。立ち上げ時はパネル表面温度の上昇により暖気が形成されていることがわかる。しかし、立ち上げ時でも居住域空間の上下温度差は場所を問わず 0.5K 以内であることが明らかとなった。定常時は室温が安定し、立ち上げ時と比較して 0.5K ほど下がったが、設定温度と比較すると 0.5K 程度高い値となった。居住域上下温度差も場所を問わず 1K 以内であることがわかる。

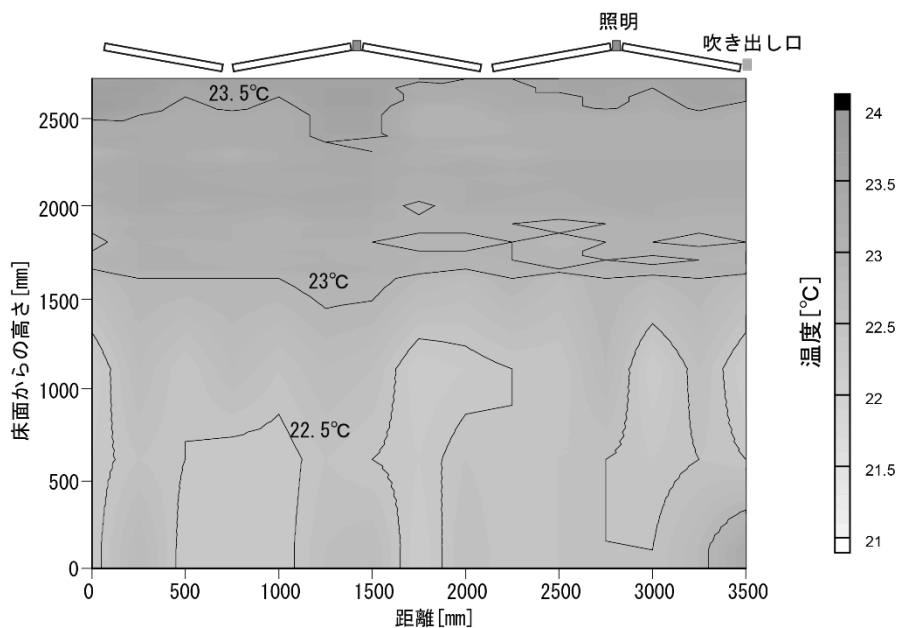


図5.16 温熱環境断面詳細（立ち上げ時）

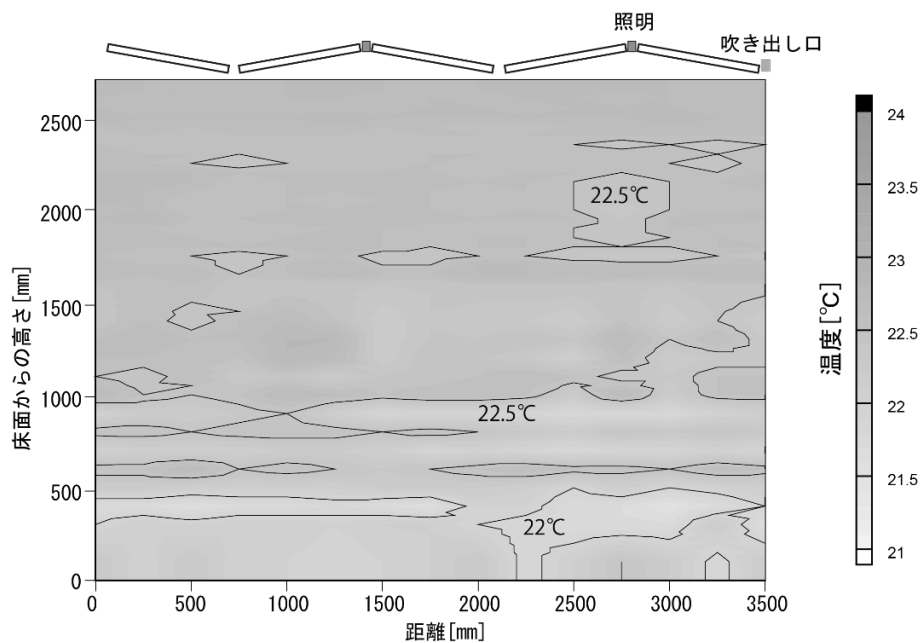


図5.17 温熱環境断面詳細（定常時）

5.3.6 風速分布

図 5.18 に定常時風速 10 分平均値を示す。微気流ファンは暖房時停止しているため気流の付加はないものの、空調運転時間の平均風速が 0.12m/s 程度であり、空調停止時間の平均風速が 0.02m/s 程度であることから、床面のデシカント RA の影響で緩やかな空気循環が執務空間内で起きていることが確認される。

図 5.19 に手動測定にて取得した風速断面分布を示す。1000mm 以下において風速が若干大きくなることが確認できるが、どの位置においても気流は静穏であることがわかった。

図 5.20 に運用時の風速出現頻度を示す。最も頻度が大きかったのが 0.1m/s となり、夏季の風速頻度傾向と比較して凸型となり、風速の変動が小さいことが確認された。

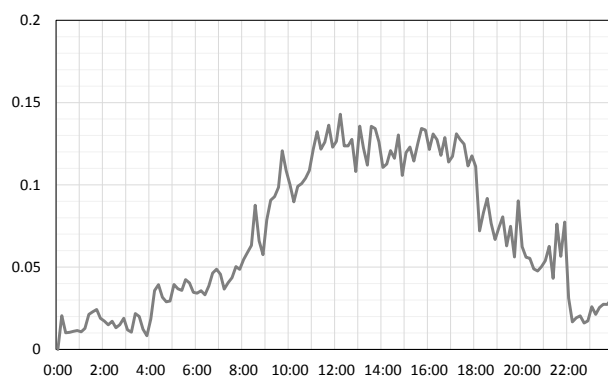


図5.18 風速平均値トレンド

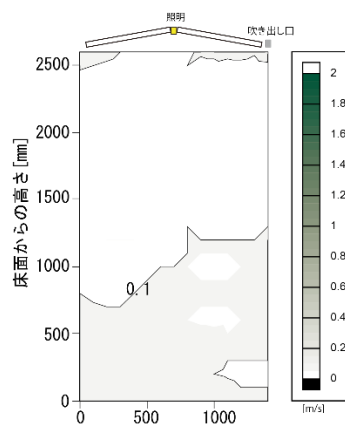


図5.19 風速断面分布

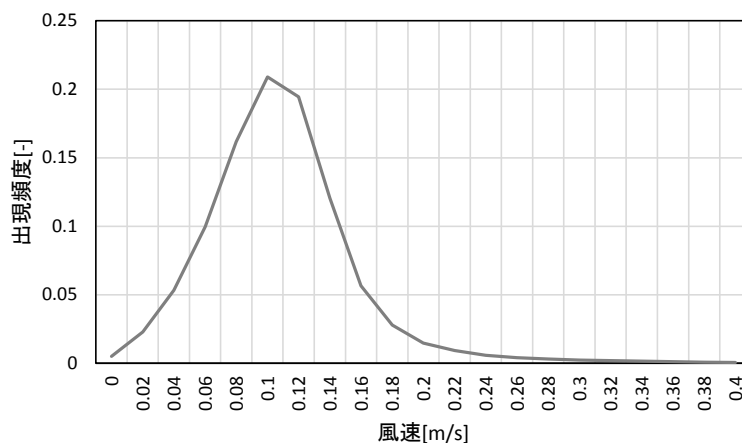


図5.20 風速出現頻度

5.4 アンケート調査結果

5.4.1 基本情報

アンケート回答者は73名であった。図5.21、図5.22にアンケート対象者の年齢構成と性別構成を示す。30代が42%、40代が36%を占め、うち約42%が女性であるため、夏季とほぼ同様の比率が得られた。自己申告結果を図5.23に示す。暑がり側の回答が27%、寒がり側の回答が52%であり、夏季と比較して暑がりが減り寒がりが増えたことから自己申告結果は外気温に依存することが明らかとなった。

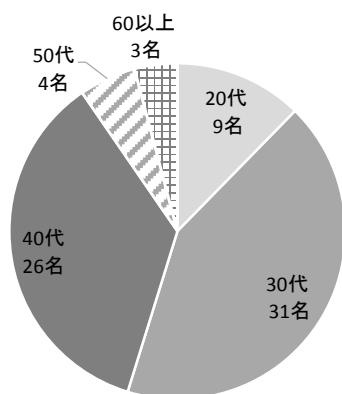


図5.21 年齢構成

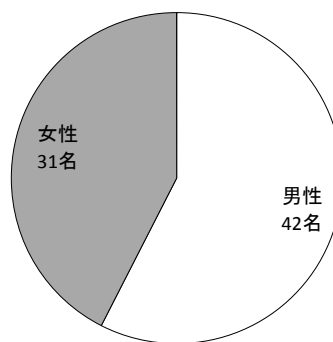


図5.22 性別構成

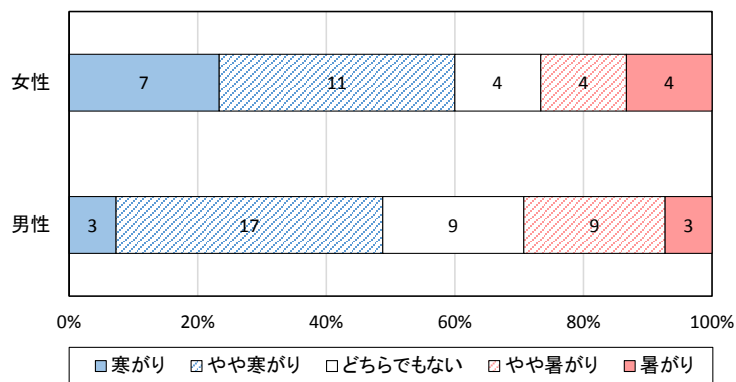


図5.23 自己申告調査

5.4.2 温冷感と湿度感

図 5.24 に部位別温冷感申告結果を示す。申告は番号選択方式で行った。寒い側の申告は頭部 11%と比較して足元は 42%となり寒いという申告が足元にかけて増加する傾向が見られた。全身温冷感は、寒い側の申告が過半数を占めたことから、運用調整の重要性が明らかとなった。既述の通り温熱環境実測結果から、室温は設定温度を達成しており PMV は 0.15 であるものの、執務者の温冷感は寒いという申告が多かった。以上より、コミッショニングによる運用最適化を図る上で、温熱環境測定に限らず、アンケート調査により執務者の感覚を調査することが重要であることが確認された。

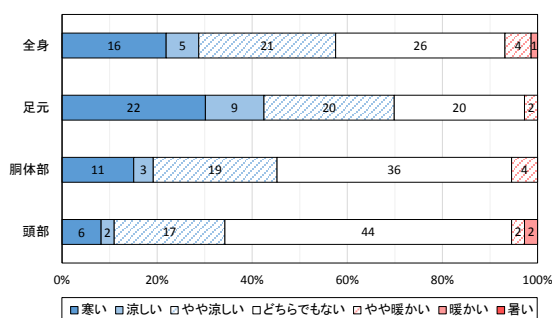


図5.24 部位別温冷感

図 5.25 に場所別温冷感申告の結果を示す。パーセンテージは在籍人数における男性の人数を示す。インテリア(A 点,B 点)の結果は、43.8%どちらでもないと回答し、暑い側の回答が 13%、寒い側の回答が 43%であった。しかし暑い側、寒い側申告のうち 77%は「やや涼しい」「やや暖かい」が占めたため、放射空調が形成した空間の温冷感は適正に近いということが出来る。しかし、ペリメータは寒い側の申告が 57%、どちらでもないとの回答が 22%であった。また、「寒い-3」との回答が 29%であったため、チルドビームによる制御の改善必要が示唆される。

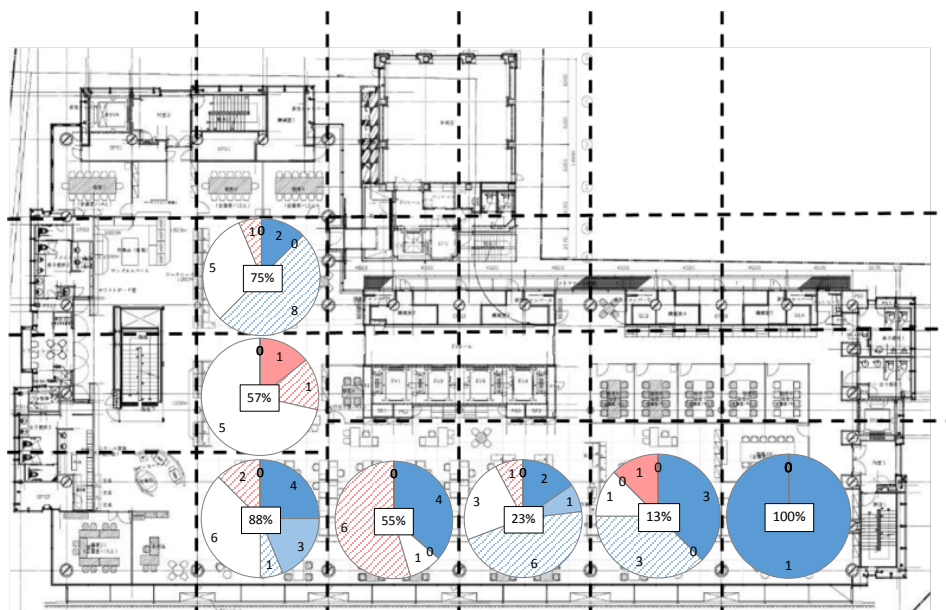


図5.25 場所別温冷感

図 5.26 に湿度感申告結果を示す。どちらでもないとの回答は 50%程度であり、主に女性から乾いているとの申告があげられた。全体でも湿っているとの回答者はいなかった。実測結果からもデシカント空調の運転開始時間を早めることや、設定湿度の調整を行う必要があげられる。

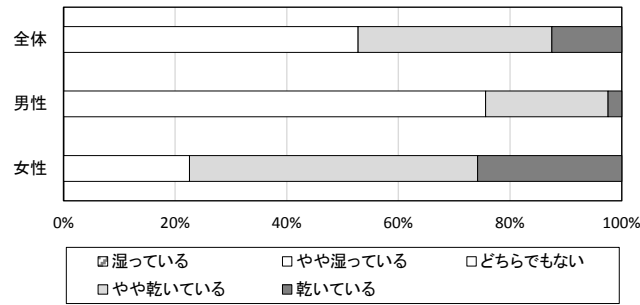


図5.26 湿度感

5.4.3 気流感

図 5.27 に気流感に対する快不快申告結果を示す。不快申告者は 14%のみであり、気流感は適正であったことが明らかとなった。また「どちらでもない」の回答を除き、快適側の申告者、不快側の申告者それぞれの気流感を分析した結果を図 5.28 に示す。「感じない」の回答は快適側申告者にしか見られず、「感じる」の回答は不快側申告者にしか見られなかった。結果より、冬季暖房時、放射空調によって形成される気流のない空間を執務者は快適だと感じるということが明らかとなった。

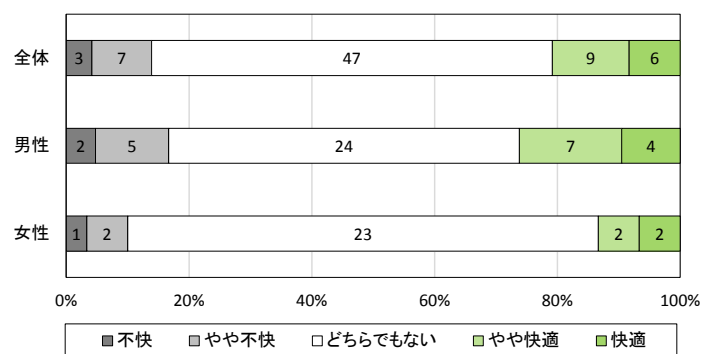


図5.27 気流快適性

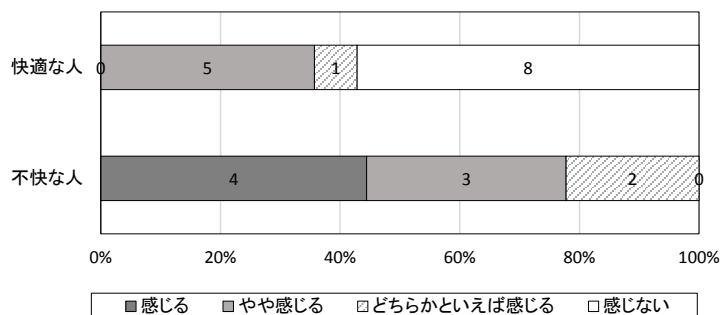


図5.28 気流感と快適性

5.4.4 総合評価

図 5.29 に快適度、受容度、満足度の申告結果を示す。「どちらでもない」を含めたプラス側の回答を快適率、受容率、満足率とすると、各々、58%、67%、63%となり、運用改善の必要性が考えられる。図 5.30 と図 5.31 全身温冷感と快適感の相関図を示す。男性・女性とも寒い側の申告が不快申告につながったことが確認できる。一方で、女性は全身温冷感±0 であっても不快側の申告結果が表れたため湿度感や足元の冷え、着衣量などその他要因が関係していると考察できため詳細分析を今後の展望としたい。

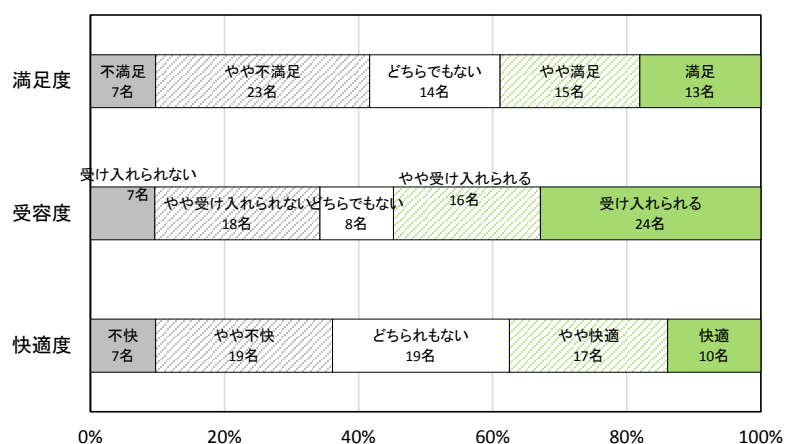


図5.29 満足度・受容度・快適度の申告

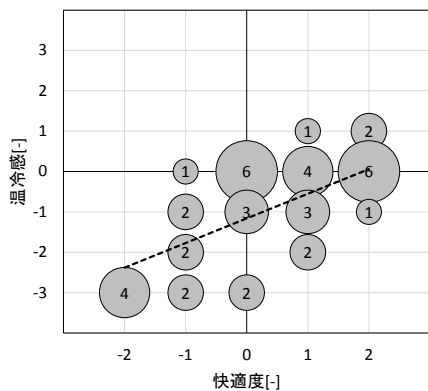


図5.30 温冷感と快適感（男性）

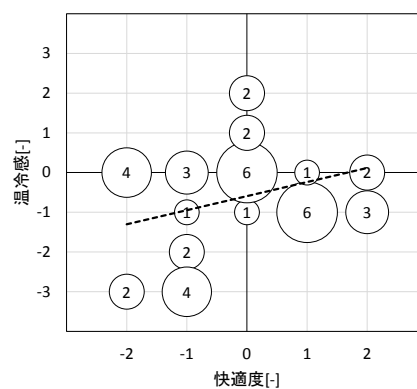


図5.31 温冷感と快適感（女性）

5.5 まとめ

冬季暖房運用の 1 年目検証にて行った、温熱環境実測結果とアンケート調査結果より以下の知見が得られた。

1. ペリメータ温熱環境

- ・ ペリメータのチルドビームは午前中に 27°C から 30°C 程度で吹き出しているが午後になると停止していたが、高さ 1100mm の位置にて室温は設定温度より 3K 高い 23.0°C となっていることから、温度調整されていることが確認できた。
- ・ 居住域上下温度差は 1.2K 程度であった。
- ・ 窓に沿って吹き出す暖風の影響で窓近傍も設定温度同等であり、窓表面温度も 20°C であることから、チルドビームにより効果的にペリメータの熱負荷が処理されていることが確認された。

2. インテリア温熱環境

- ・ デシカント空調機が 24°C 程度の温風を吹き出しているが、天井内の温度は室温より 4.2K 程度低い 18.8°C であった。
- ・ A 点は B 点よりも平均温度が 0.5K 程度低く、居住域上下温度差は A 点にて 0.88K、B 点にて 0.27K であった。南面の窓とエレベータホールや階段室影響が考えられる。
- ・ 定常時はパネルに通水されなかったことから MRT の変動域は小さかった。また、MRT の中央値は 23.6°C、室温は 23.4°C となり、室温より高くなった。パネルの稼働時間は家具や壁なども 2K 程度上がることが理由としてあげられる。
- ・ 高さ 1100mm における湿度は 10 時の 35% から 17 時の 47% まで緩やかな上昇をし続ける。
- ・ 11 時の PMV は 0.15 であった。
- ・ 空調運転時の平均風速は 0.12m/s となった。最も頻度が大きかったのは 0.1m/s であり、下記の風速頻度傾向と比較して凸型となり、風速の変動が小さいことが確認された。

3. アンケート調査結果

- ・ アンケート回答者は 73 名であり、30 代が 42%、40 代が 36% を占め、うち約 42% が女性であった。
- ・ 温冷感申告結果は寒い側の申告が頭部 11% と比較して足元は 42% となり足元にかけて増加する傾向が見られた。また、場所別に温冷感申告結果をみるとペリメータ側に「寒い-3」の申告が集中したため、チルドビームの運用改善必要性が示唆された。
- ・ 湿度感は乾いているとの申告は 50% 程度となり、主に女性の申告が多かった。
- ・ 気流の不快感申告者は 14% のみであり、気流を感じないとの申告は快適側申告者にしかいなかったことから、放射暖房による気流のない空間は快適であるという結果を得た。
- ・ 総合評価は快適率 58%、受容率 67%、満足率 63% であり、運用改善の必要性が明らかとなった。また、温熱環境実測値が良好であったことに対してアンケート調査結果が悪かったため、コミショニングを行っていく上で執務者の主観的評価を調査することの重要性が示唆された。

6 章 シミュレーションによる省エネルギー効果検証

6 シミュレーションによる省エネルギー効果検証

6.1 はじめに

微気流併用型放射空調は放射空調に微気流を付加することで設定温湿度の緩和を可能とし、エネルギー消費量を削減することを設計意図としてもつ。既述の章で、設定温湿度を 27°C に緩和しても室内温熱環境は良好であり、微気流の効果により快適であると申告した執務者が多く出たことから、快適性を向上させたうえで設定温湿度を緩和することができていることが明らかとなった。

第 6 章では、微気流併用型放射空調が AHU や FCU を用いた従来空調や一般的な水式放射空調とのエネルギー消費量の比較を行うことを目的とする。熱負荷計算に The BEST Program を使い、エネルギー消費量の算出に LCEM tool を用いることで、対象期間における一般大規模オフィスのエネルギー消費量時系列データを得ることができる。シミュレーションにより、Y ビルのみならず一般オフィスに微気流併用型放射空調システムを導入した場合の省エネルギー効果を検討する。章の構成は 6.2 に実際に運用した際の各空調機器の処理熱量を示す。6.3 に The BEST Program 設定条件と熱負荷算出結果、6.4 に LCEM tool の設定条件とエネルギー消費量算出結果を示し。6.4 にまとめとする。

6.2 エネルギー消費量の運用実績

26℃ 設定、27℃ 設定、28℃ 設定それぞれのパネル処理熱量の実測値を図 6.1 に示す。処理熱量は流量と冷水往還温度差より簡易的に算出を行った。結果から設定温度を緩和することによって熱負荷が減り、パネル処理熱量が小さくなるため、パネル稼働時間も減少することがわかる。よって設定温度緩和効果は省エネルギー効果があることが明らかとなった。

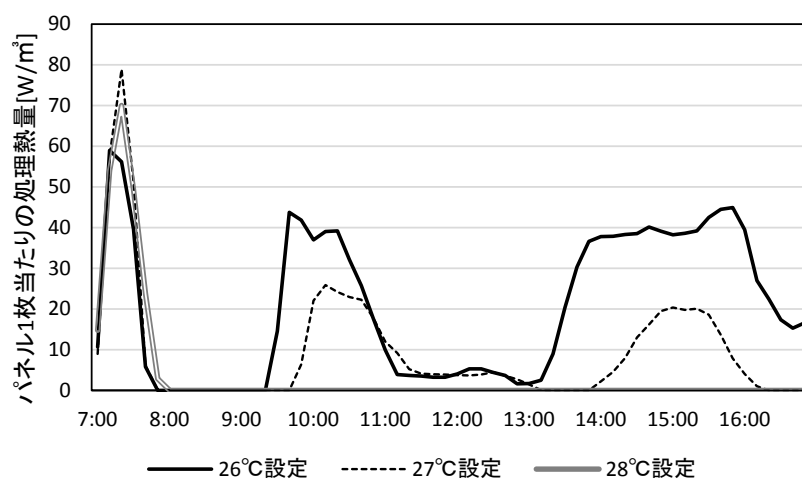


図6.1 設定温度とパネル処理熱量

図 6.2 に BEMS にて取得した運用時の熱量積算データを示す。

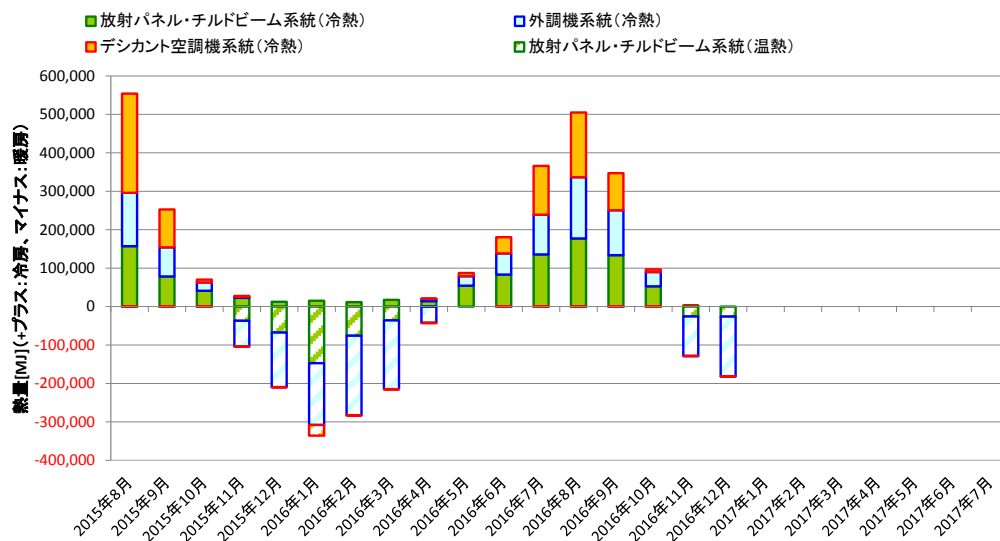


図6.2 熱量に関する BEMS データ

6.3 The BEST Program を用いた熱負荷シミュレーション

6.3.1 建物モデル The BEST Program

The BEST Program (BEST : Building Energy Simulation Tool) は、建築物・空調設備のみならず、照明設備、給湯設備、昇降機設備等をも含めた建築物の総合的なエネルギーシミュレーションツールである。このツールは空調分野の年間消費エネルギーシミュレーションツールとして 30 年以上前に開発された HASP/ACLD(動的熱負荷計算プログラム)と HASP/ACSS(空調システムシミュレーションプログラム)及びこれをもとに開発された関連プログラムに代わるツールとして 2005 年度から開発が着手された。現在では継続的な BEST の開発・運用・支援活動を目的とした「BEST コンソーシアム」が IBEC(一般財団法人 建築環境・省エネルギー機構)内に設立されている。

BEST はユーザーの利用目的に合わせて簡易版・改正省エネ基準対応ツール・専門版で構成されている。簡易版は計画初期段階で発注者や建築設計者でも計算を行うツール。改正省エネ基準対応ツールは新築だけでなく既存建物の省エネ改修検討で、設備設計者が精度よく計算を行うツール。専門版は詳細検討を行う設備設計者やモジュール開発を行う研究開発者向けのツールとなっている。今回は専門版を使用した。専門版は、建築外皮詳細設計検討として、開口部の寸法や庇・断熱材厚さ等を入力し、各設備システムとして空調ゾーニングや空調機容量・制御方法、ブラインド制御方法、照明調光システムも設定できる。これにより、最大負荷計算や年間負荷計算、さらには建築物全体のエネルギー消費量を求めることができる。計算モデルの再利用、機能拡張、モデリングが容易な JAVA 言語を用いたオブジェクト指向のため、ユーザーは自由にモジュールを開発できるとされているが、今回は、Excel によりモジュールを組むことができる LCEM tool を用いて空調システムをモジュール化し、BEST は年間熱負荷計算を行うために使用することとした。熱負荷計算のみを行うことを、BEST では建築単独計算と呼び、この場合は空調との連成計算とは異なる簡単な空調入力データを用意しインプリシット法のみにより計算される。

6.3.2 建物モデル

(1) ゾーン設定方法

建物モデルの平面図を図 6.1 に示す。実測対象の Y ビルを参考に大規模オフィスビルを想定したもので、西面全面開口の執務空間で隣室は設定せず、断熱境界とした。ゾーンは空調方式に従って設定した。インテリア 1、インテリア 2 は空気式空調の場合は AHU、放射空調の場合はデシカント空調の台数に従い 2 つに分け、その中でも VAV ユニットに合わせてインテリア 1-1、インテリア 1-2 といったように 2 つに分けた設定した。各ゾーンの面積と空調方式を表 6.1 に示す。

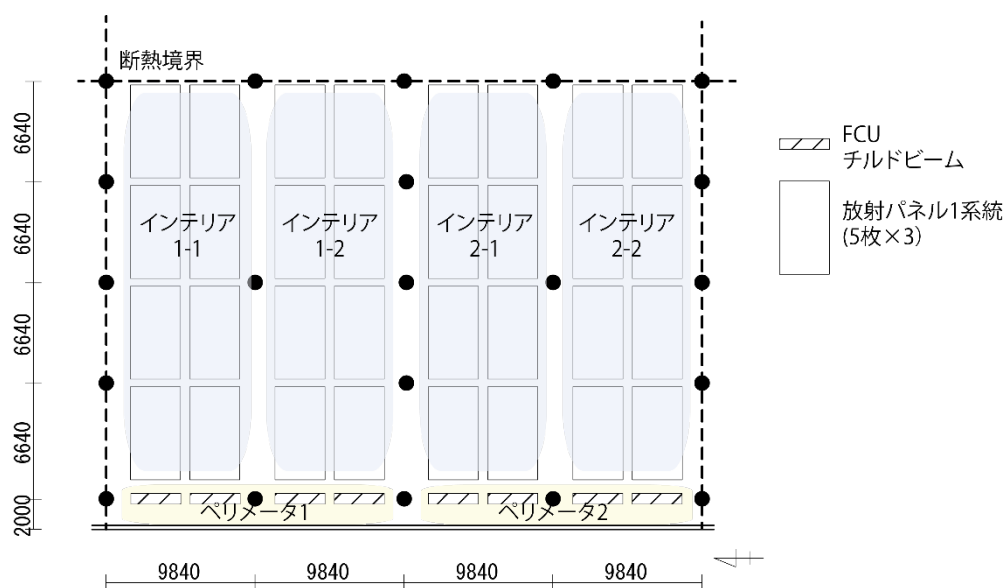


図6.3 熱負荷計算建物モデル

表6.1 各ゾーン面積と二次側空調方式

ゾーン名	面積	空調機器と台数	
		空気式空調	放射空調
インテリア 1	522.7m ²	AHU_1 台	放射パネル_16 系統、デシカント空調機_1 台
インテリア 2	522.7m ²	AHU_1 台	放射パネル_16 系統、デシカント空調機_1 台
ペリメータ 1	59.04m ²	FCU_4 台	チルドビーム_4 台
ペリメータ 2	59.04m ²	FCU_4 台	チルドビーム_4 台

(2) 建材条件

窓ガラスは 12mm 厚の「熱吸グリーン+透明」を複層で使用し、スラット標準角 45°のブラインドを内蔵とした。各壁体構造は Y ビルと同様とし、表 6.2 のように設定した。

表6.2 壁体構造

壁体名	部材名	厚さ
内壁	せっこうボード	12mm
	非密閉中空層	-
	コンクリート	120mm
	非密閉中空層	-
	せっこうボード	12mm
床・天井	コンクリート	150mm
	非密閉中空層	-
	合板	15mm
	カーペット類	10mm
柱	コンクリート	450mm

(3) 内部発熱

室内の内部発熱は人体発熱、照明発熱、機器発熱があげられ、いずれも冷房負荷である。内部発熱のスケジュールは BEST 講習会のテキスト¹⁾で使用されている、実際の事務所ビルにおける調査結果を参考に設定されたものを使用する。各入力スケジュールを図 6.2、図 6.3、図 6.4 に示す。

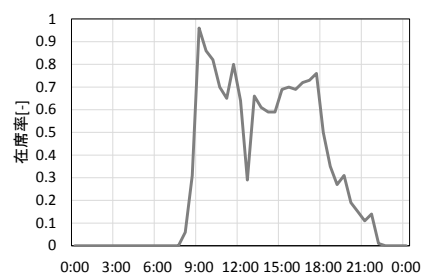


図6.4 人体発熱スケジュール

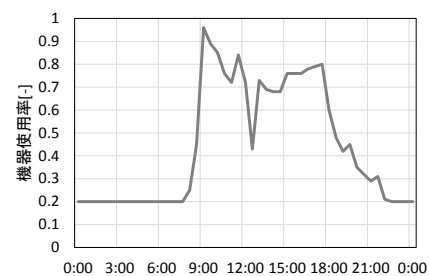


図6.5 機器発熱スケジュール

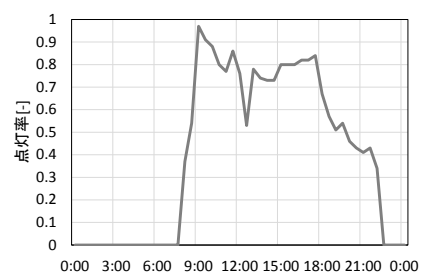


図6.6 照明発熱スケジュール

その他詳細入力条件は付録に示す。

6.3.3 熱負荷計算結果

シミュレーションによる熱負荷計算は夏季冷房期間である6月1日から9月30日まで実行した。空調設定温度は26℃と27℃とし、運転時間は8時から予冷運転、9時から17時までを通常運転とし、Yビルの運用と似た運転時間に設定した。計算結果の一例を図6.5、図6.6に、各ゾーンにおける算出結果を表6.4に示す。

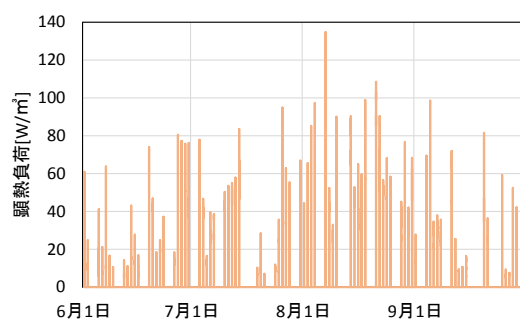


図6.7 ペリメータ顕熱負荷(26℃ 設定)

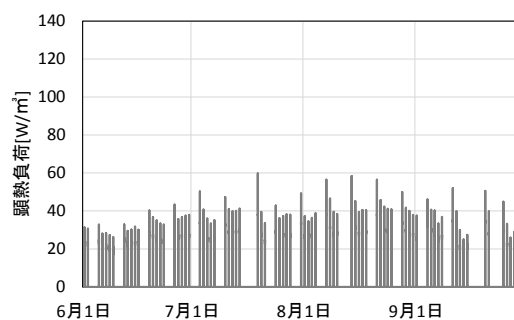


図6.8 インテリア顕熱負荷(26℃ 設定)

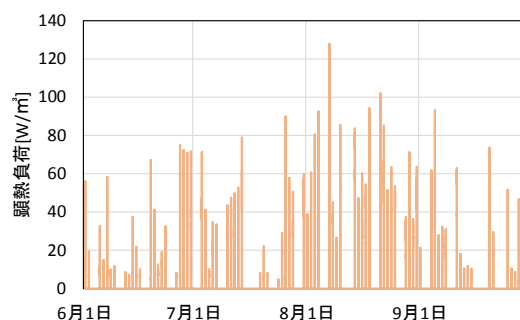


図6.9 ペリメータ顕熱負荷(27℃ 設定)

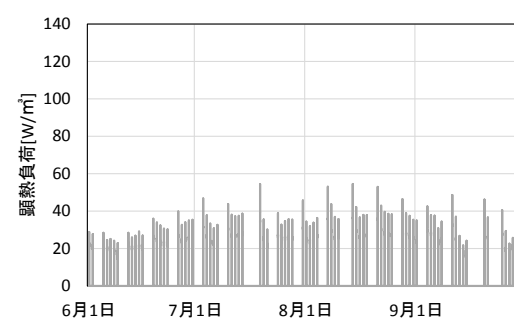


図6.10 インテリア顕熱負荷(27℃ 設定)

表6.3 熱負荷計算結果

			単位	インテリア 1045.4 m ²		ペリメータ 118.08 m ²	
				顕熱	潜熱	顕熱	潜熱
26℃ 設定	合計	6 月	MW	10.9	5	9.7	2.5
		7 月	MW	11.7	6.1	12.6	3.1
		8 月	MW	14.3	7.8	23	4
		9 月	MW	9.9	4.2	9.2	2.1
	最大負荷		W/m ²	59.7	55.3	134.7	27.6
27℃ 設定	合計	6 月	MW	9.9	4.5	8	2.3
		7 月	MW	10.8	5.6	10.6	2.8
		8 月	MW	13.4	7	20.2	3.6
		9 月	MW	9	3.8	7.5	1.9
	最大負荷		W/m ²	54.5	30.8	127.9	15.6

表 6.4 に熱負荷の 1 日の挙動を示す。6 月 1 日のように負荷が少ない日は最大 15W/m^2 程度となる。一方で最大負荷を記録した 8 月 14 日は連休により建物内部に蓄積された負荷除去のため、空調運転開始時間の負荷が最も多く、徐々に減少する傾向が見られた。

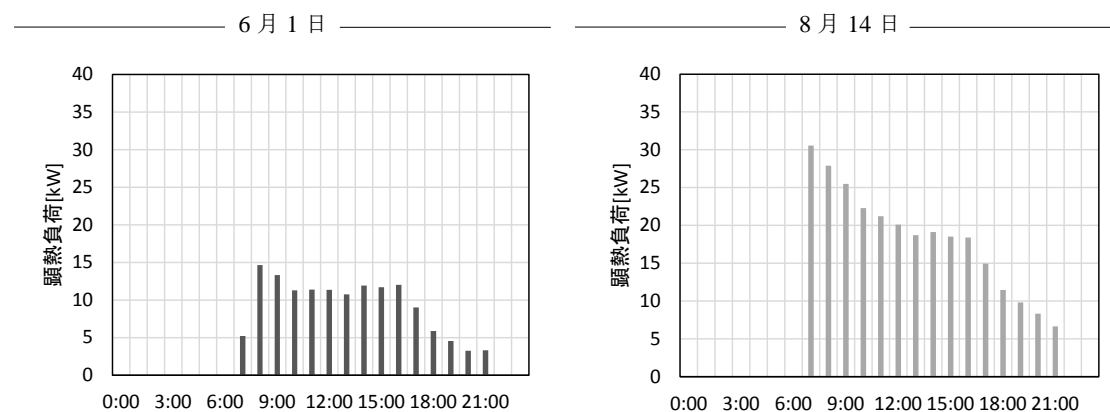


図6.11 熱負荷の 1 日の変動

以上の結果を LCEM tool に熱負荷条件として与える。

6.4 LCEM tool を用いたエネルギー消費量シミュレーション

6.4.1 LCEM tool

エネルギー消費量の比較検討を行うために、LCEM tool を使用してエネルギー消費量の算出を行った。LCEM(Life Cycle Energy Management ; ライフサイクルマネジメント)手法とは、建築物の企画・計画・設計から、施工・検査・運用・保全を経て改修に至るまでのライフサイクルの各フェーズを通じて一貫したエネルギーに係る管理指標、管理目標を定め、共通したツールを用いてその達成度を評価・検証する手法をいう。この LCEM 手法を遂行するための省エネルギーの達成度を定量的に図る役割を担うのが、空調システムを対象に開発されたシステムシミュレーションツールである LCEM tool である。このソフトを用いることでライフサイクルを通じた省エネルギー目標の明確化、オフピーク性能も踏まえた省エネルギー性能の把握、運用状態のモニタリングの適正化と適格なコミッショニングを図ることができる。

LCEM tool は Excel をプラットフォームとして開発されており、Excel を用いたオブジェクトセルズ法という解法を用いて空調システムの運転状態値を求める。オブジェクトセルズ法とは Excel の複数のセル群に数式や諸元を記入し、一つの単位として扱う計算方法である。このセル群を LCEM tool では機器オブジェクトと呼び、連結することで空調システムを構築していく。オブジェクトは原則として上から、通信部、制御部、演算部、属性部の4つの部分で構築される。通信部はオブジェクト間のデータの受け渡しを行い、制御部は制御目標値の設定など、属性部には機器の属性(定格使用など)を入力する。シミュレーターとしての心臓部は演算部であり、演算部では各機器の状態地を算出するための数式が記述されている。よってここで、消費電力量などが算出される。また、セルの色分けもされており、ユーザーが数値を直接入力するのは黄色のセルのみである。これらのセルは熱負荷計算結果や BEMS から得られる実測データなどを1時間毎の連続するデータとして読み込むことができ、計算結果も各オブジェクトにおける任意のセルの数値を1時間毎の連続するデータとして出力する。

6.4.2 空調システムモデル

AHU と FCU を使用した従来空調と水式放射空調、微気流併用型水式放射空調のエネルギー消費量比較を行うために表 6.1 の通りに空調システムのモデルを作成した。一次側はどちらも同じ方式とし EHP を 4 台設置、熱源台数制御コントローラにより必要熱量・必要流量に従い台数制御を行うこととした。モデルを図 6.9 に示す。二次側は図 6.10、図 6.11 のように構築した。各機器オブジェクトは表 6.5 に示す既存オブジェクトを引用して構築したが、放射空調二次側のモデルにおいて、放射空調・熱交換器のオブジェクトは作成したものを使用した。また、デシカント空調機はメーカー値から、微気流ファンの動力も同様に算出を行った。

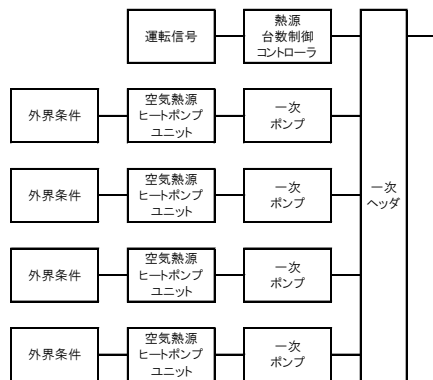


図6.12 一次側システムモデル

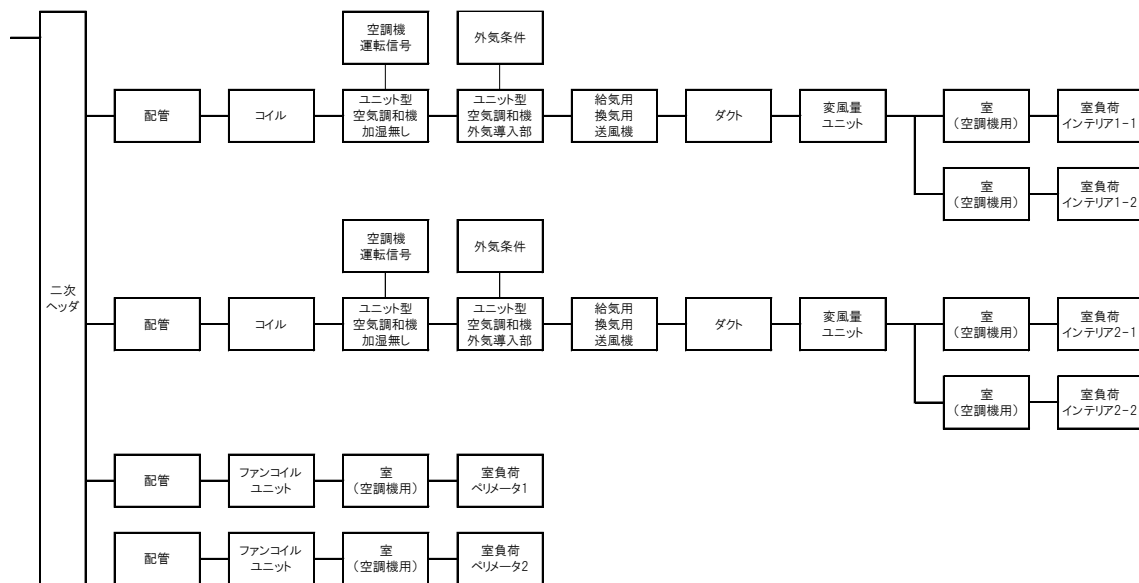


図6.13 従来空調二次側システムモデル

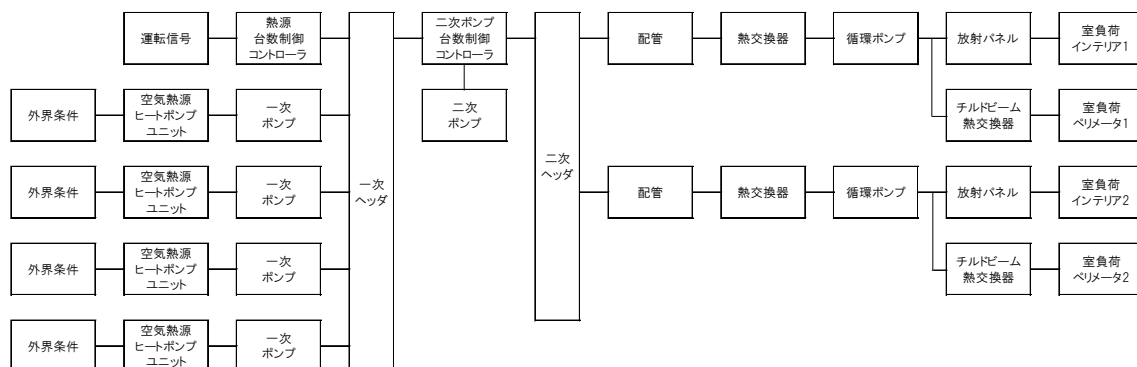


図6.14 水式放射空調二次側モデル

表6.4 使用機器オブジェクト

		使用オブジェクト	sheet 名
共通部分	熱源	空気熱源 HP（高効率型コンパクトタイプ-散水）_RR-XX3-310H(MS)_118-180_Ver310	118
		熱源台数制御（一般システム用）_COHS-GEN-303XX_Ver303	熱源台数制御（一般システム 4台_）
	一次ポンプ	冷温水一次ポンプ（汎用）_PCH-XX-303-01_Ver303	-
	二次ポンプ	冷温水二次ポンプ（汎用）_PCH2-XX-303-01_Ver303	-
		二次ポンプ台数制御_COPS-SSPEC-303XX_Ver303	-
		複式ポンプ方式ヘッダ（一般用）_HD2PS-GEN-303XX_Ver303	複式ポンプ方式ヘッダー（一般システム_熱源 4台）
	配管	配管_PIPE-XX-303XX-00_Ver303	-
従来空調	AHU	加熱・冷却コイル（ユニット形空調機）_CHC(U)-XX4-303N_30-160_Ver303	8000
		ユニット形空調機（加湿器）_HU(U)-XX-303-00_Ver303	HU(U)-XX-303-N（加湿なし）
		ユニット形空調機（外気導入）_OA(U)-XX-303-00_Ver303	-
		給気用還気用送風機（汎用）_FSFR-XX-303_Ver303	-
		ダクト_DUCT-XX-303-01_Ver303	-
		変風量ユニット_VAV-XX-303-01_Ver303	-
		室(空調機用)_ROOM-XX-303-01_Ver303	-
	FCU	ファンコイルユニット_FCU-XX1-303CL_200-800_Ver303	300
放射空調	プレート式熱交換器	-	-
	三次ポンプ	冷温水一次ポンプ（2P）_PCH(2P)-XX1-303SI_Ver303	XX1 2P50Hz_80x65_5.5
	配管	配管_PIPE-XX-303XX-00_Ver303	-
	放射パネル	-	-
	チルドビーム	-	-

(1)放射空調オブジェクト

放射空調オブジェクトは既往研究²⁾を参考に顕熱負荷と冷水往温度から流量を導出する式を構築し、作成したオブジェクトを使用した。流量式は、モックアップ実験³⁾により算出された単体放射パネル能力式から立式した。ただし最大流量 4L/min、冷水還温度は 3K で一定であることを組み込んで算出されるように演算部を構築した。流量式の導出課程を下記に示す。

【流量導出式】

モックアップ実験から得られた平均パネル能力式(1),式(2)を既往研究より引用する。

$$q_m = \frac{1}{n_s} \sum_{i=1}^{n_s} q_i = \frac{K(T_a - T_{in})Q / \beta}{2n_s} \left\{ 1 - \left(\frac{Q / \beta - 1}{Q / \beta + 1} \right)^{n_s} \right\} \quad (1)$$

$$\beta = \frac{KA}{2C_p \rho} \quad (2)$$

式(1)において、 $x = Q/\beta$ と置換すると式(3)となる。

$$q_m = \frac{K(T_1 - T_a)x}{2n_s} \left\{ 1 - \left(\frac{x-1}{x+1} \right)^{n_s} \right\}$$
$$x \left\{ 1 - \left(\frac{x-1}{x+1} \right)^{n_s} \right\} = \frac{q_m \cdot 2n_s}{k(T_a - T_{in})} = \frac{2s'}{(T_a - T_{in})KA} = y \quad (3)$$

β は固定値であるため値を代入し、 Q に値を 0 から 3.5 まで 0.1 刻みで図 6.14 のように代入していくと近似式(4)が得られる。

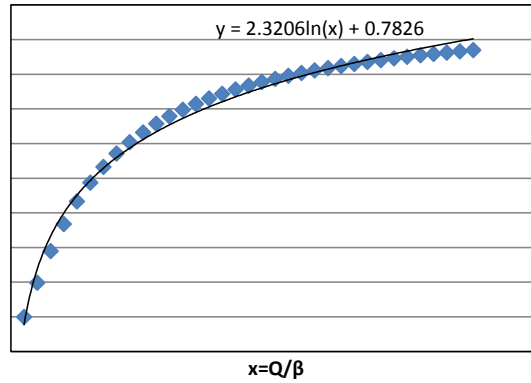


図6.15 近似式の導出

$$y = 2.3106 \ln(x) + 0.7826 \quad (4)$$

以上より流量式(5)が算出される。

$$Q = \beta \cdot e^{\left(\frac{1}{2.3206} \frac{q_m \cdot 2n_s}{K(T_a - T_i)} - 0.7826 \right)} \quad (5)$$

配管 PIPE-XX-303XX-00		放射パネル ROOM-XX-303-01		インテリア1	
エラー状態	0	エラー状態	0	運転状態 0:停止 1:冷房 2:暖房	0
送水判定 0:停止 1:運転	0	運転状態 0:停止 1:運転	0	顕熱負荷[kW]	0
送水モード 0:停止 1:冷房 2:暖房	0	送水判定 1:冷房 2:暖房	1	潜熱負荷[kW]	0.0
冷温水往温度[°C]	17.00	送水モード 0:停止 1:冷房 2:暖房	0	基準温度[°C]	26.0
冷温水還温度[°C]	17.00	顕熱負荷インテリア1合計[kW]	0	基準湿度[%]	50.0
1フロア当たりの総水量	0.0	冷温水往温度[°C]	17		
全フロア総水量[L/min]	0	冷温水還温度[°C]	17.0		
		1フロアあたりの水量[L/min]	0.0		
		基準温度[°C]	26.0		
		基準湿度[%]	50.0		
属性					
フロア数	5				
		放射パネル演算			
		室運転要求 1:冷房 2:暖房	1		
		顕熱処理量[W]	0		
		最大水量[m³/s]	0		
		最大水量時の平均パネル能力[W/m²]	76		
		最大水量時の処理顕熱量	558		
		未処理顕熱負荷[kW]	0		
		水量[m³/s]	0		
		水量[m³/s] 最低流量を考慮	0		
		1系統あたり水量[L/min]	0.0		
		平均パネル能力[kW/m²]	0		
		冷温水還温度[°C]	17		
		放射パネル属性			
		最大水量[L/min]	4.0		
		最低水量[L/min]	0		
		熱貫流率[W/(K・m²)]	10		
		パネル枚数	5		
		総系統数	48		
		パネル総数	240		
		パネル面積[m²]	1		
		水の比熱[J/(kg・K)]	4,186		
		水の密度[kg/m³]	1,000		
		β [m³/s]	0		

図6.16 放射パネルオブジェクト

(3)微気流ファン

微気流ファンの動力は既報を参照し、5フロアで5213[kWh]とした。

(3)熱交換器オブジェクト

熱交換器はチルドービームと、一次側と二次側の熱交換の2種類構築した。チルドービームの熱交換器は簡易的なものとし、冷水往還温度差を3°Cで一定とし、流量は式6.3にて算出した

$$Q = \frac{S \cdot 60}{(T_{out} - T_{in}) \cdot C_p}$$

一方で一次側と二次側の熱交換器はYビルと同様にプレート式熱交換器を採用した。プレート式熱交換器の計算方法には、対数平均温度差法と有効率—NTU法があるが、有効率 ϵ の値が既知ではなかったため、今回は対数平均温度差法を用いる。対数温度差とは式6.4で表されるもので、図6.12のように高温流体と低温流体の温度差で表す。オブジェクトは式6.5、式6.6を用い、対数温度差平均法にならって収束計算を行うことで一次側冷水還温度差を算出する。総括伝熱係数 $U[W/m^2]$ の算出は流量により変化するモデルとした。詳細には、設計条件から設計時の総括伝熱係数を計算し、流量によって境膜伝熱係数を流量の0.8乗比例で変化することとし、総括伝熱係数を再計算する。Excel VBAに記述したプログラムを図6.13に示す。

$$\Delta t_m = \frac{\Delta T_A - \Delta T_B}{\ln \frac{\Delta T_A}{\Delta T_B}}$$

$$q = QC_p \Delta t$$

$$q = aU \Delta t_m$$

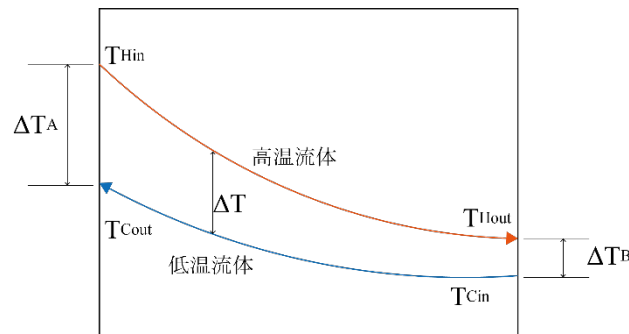


図6.17 対向流型プレート式熱交換器特性

```

Function HEXtoQc(設計高温側入口温度 As Double, 設計高温側出口温度 As Double, 設計高温側流量 Lmin As Double, 設計低温側入口温度 As Double, 設計低温側出口温度 HEXtoQc As Double, 設計低温側流量 Lmin As Double, 伝熱面積 m2 As Double, 総括伝熱係数 As Double, _
    演算高温側入口温度 As Double, 演算高温側算出口温度 As Double, 演算高温側流量 Lmin As Double, 演算低温側入口温度 As Double) As
Double

Dim Thin0 As Double, Thout0 As Double, Fh0 As Double, Tcin0 As Double, Tcout0 As Double, Fc0 As Double, A0 As Double, U0 As Double, _
    Thin_en As Double, Thout_en As Double, Fh_en As Double, Tcin_en As Double, Tcout_en As Double, Fc_en As Double, U1 As Double, _
    twkw As Double, h00 As Double

Dim Q0 As Double, Q1 As Double, TTmin As Double, TTmax As Double, loopcount As Double, _
    dTh As Double, dTc As Double, LMTD0 As Double, NTU_H0 As Double, NTU_L0 As Double, AA0 As Double, h01 As Double, _
    dT11 As Double, dT12 As Double, LMTD1 As Double, NTU_H1 As Double, NTU_L1 As Double, aa1 As Double, h11 As Double, TEMPO As Double

Thin0 = 設計高温側入口温度
Thout0 = 設計高温側出口温度
Fh0 = 設計高温側流量 Lmin
Tcin0 = 設計低温側入口温度
Tcout0 = 設計低温側出口温度
Fc0 = 設計低温側流量 Lmin
A0 = 伝熱面積 m2
U0 = 総括伝熱係数 [W/m2/℃]

Thin_en = 演算高温側入口温度
Thout_en = 演算高温側算出口温度
Fh_en = 演算高温側流量 Lmin
Tcin_en = 演算低温側入口温度

twkw = 0.00005 'tw/kw=0.8[mm]/1000/16[W/m℃,SUS304]=0.00005

'U(設計値からの U のため、汚れも考慮されている)の境膜伝熱係数 h(高温側低温側同流量設計)
'U = 1/(1/h01 + 1/h02 + twkw) h01 = h02
h00 = 2 / (1 / U0 - twkw) '定格流量時の境膜伝熱係数 h
Q1 = Abs(Thin_en - Thout_en) * Fh_en * 4.186 / 60 '高温側から熱量算出

'挟み打ち法で解を計算
TTmin = Tcin_en
TTmax = Thin_en
loopcount = 0

Do
    Tcout_en = (TTmin + TTmax) / 2
    Fc_en = Q1 * 60 / 4.186 / (Tcout_en - Tcin_en)

'変流量時の総括伝熱係数の計算
U1 = 1 / ((1 / (h00 * (Fh_en / Fh0) ^ 0.7) + 1 / (h00 * (Fc_en / Fc0) ^ 0.7)) + twkw)

dTh = Thin_en - Tcout_en '高温側アプローチ
dTc = Thout_en - Tcin_en '低温側アプローチ

If dTh > dTc Then
    TEMPO = dTh
    dTh = dTc
    dTc = TEMPO
End If

If (dTc - dTh) > 0.00001 Then
    MTD = (dTc - dTh) / Log(dTc / dTh)
Else
    MTD = dTc
End If

A1 = Q1 * 1000 / (U1 * MTD) '伝熱効率から逆算 伝熱面積の方が熱量より小さい値のため、これを判断材料とする。
If A0 < A1 Then
    TTmax = Tcout_en
Else
    TTmin = Tcout_en
End If

loopcount = loopcount + 1

Loop While ((A0 < A1 - 0.00001 Or A0 > A1 + 0.00001) And loopcount < 1000)

If loopcount = 1000 Then Fc_en = 0
HEXtoQc = Fc_en

End Function

```

図6.18 熱プレート式熱交換器算出関数 HEXtoQc の VBA 入力詳細

(4)ヒートポンプ内蔵デシカント空調機

図 6.18 にヒートポンプデシカント空調機の模式図を示す。Y ビルに使用されているデシカント空調機は通常のデシカント空調機とは異なり、ヒートポンプを内蔵している。冷水コイルと温水コイルに供給される熱媒の生成において熱源を介さず、ヒートポンプによりデシカント空調単体で生成することができ、更なる省エネルギー効果が期待できる。

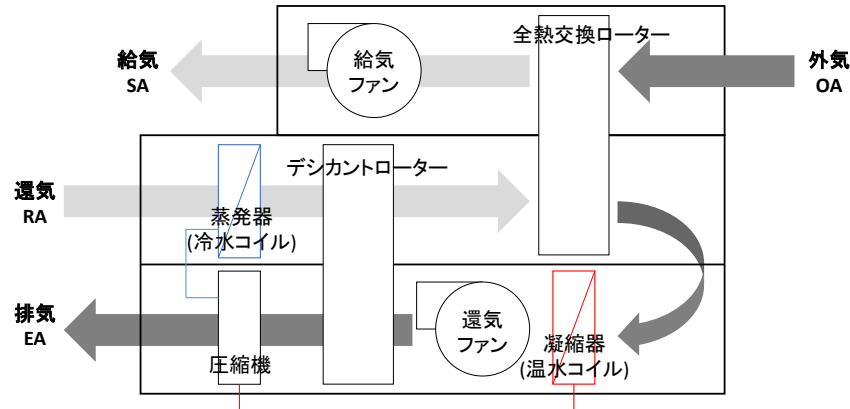


図6.19 ヒートポンプ内蔵デシカント空調機模式図

LCEM ツールにはこの形式のデシカント空調機モデルが無いため、外気処理熱量と定格熱量から算出される COP より、消費電力とファン動力を試算した。算出課程は以下となる。この式を LCEM ツールの期間構築シートに組み込むことで対象期間における 1 時間ごとの電力消費量を算出した。

【デシカント空調機消費電力】

式(6)より外気処理熱量を算出し、外気処理熱量と定格熱量の比から式(7)のように負荷率を導出する。ただし、デシカント空調機の定格熱量は定格風量 12000m³/h において 167kW であり、定格風量比に定格熱量は比例することとした。今回は Y ビルにも用いられている定格風量 11300m³/h の機器を選定したため、定格熱量は約 157.3kW となる。

$$q_o = (h_o - h_a) \times 0.33 \times Q_o / 1000$$

$$\alpha = q_o / q \times 100$$

メーカー設計値より導いた冷房時 COP 目安導出式(8)を用いてデシカント消費電力を式(9)より算出する。

$$COP = -9.08 \times \alpha^2 + 16.5 \times \alpha$$

$$E_{dec} = q_o / COP$$

また、ファン動力は式(9)より算出した。

$$E_{fan} = (7.5 \times 2) \times (Q_o / 11300)^3$$

6.4.3 入力条件の決定プロセス

一次側や放射空調二次側各機器の定格容量は Y ビルの空調機器リストを参考に決定した。従来空調の AHU と FCU の定格容量に関しては、研究室にて本年度作成を行った「デジタル資料集成」を参考に The BEST Program にて算出された最大熱負荷とその時の外気温等から選定を行ったうえで、LCEM tool で確認を行い決定した。各空調設定条件を表 6.5 に示す。

表6.5 空調機器設定条件

	空調機器と台数(5 フloor)	
	従来空調	放射空調
熱源	EHP チラー：4 台, 冷房 118kW, 3 連結, 送水温度 7°C	EHP チラー：4 台, 冷房 118kW, 3 連結, 送水温度 13°C
水搬送	一次ポンプ：4 台, 1015L/min 二次ポンプ：3 台, 1130L/min	一次ポンプ：4 台, 1015L/min 二次ポンプ：3 台, 1130L/min 三次ポンプ：2 台, 1233L/min
二次側	AHU：10 台, 8000m ³ /h, 給気温度 15°C FCU：40 台, ユニットサイズ 300	放射パネル：0.46 枚/m ² , 送水温度 17°C プレート式熱交換器：2 台 HP 内蔵デシカント空調機：2 台, 11300m ³ /h チルドビーム：40 台

また、AHU 外調機オブジェクトとデシカント空調機オブジェクトに入力条件として与える導入外気量は必要換気量と在席密度を基に値を決定した。ただし外気量は 8.3L/(s・人) とした。図 6.2 に 1 日の外気導入量のスケジュールを示す。

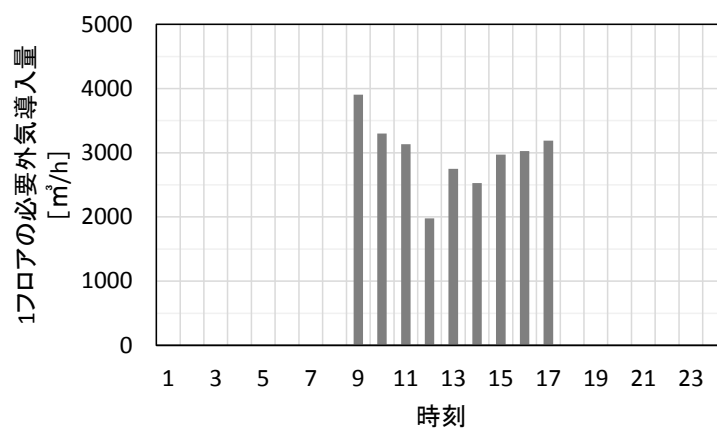


図6.20 1フロアの必要外気導入量

6.4.4 エネルギー消費量計算結果

電力消費量から一次エネルギー消費量への換算には 9.76[MJ/kWh]を用いた。図 6.20 に微気流併用型放射空調を 27°C55%設定で運用した際の各月別エネルギー消費量算出結果を示す。8月 は約 20MJ/m²となったのに対し、6月は主にデシカント空調機の稼働回数が減ったことから、約半分の約 10MJ/m²となった。

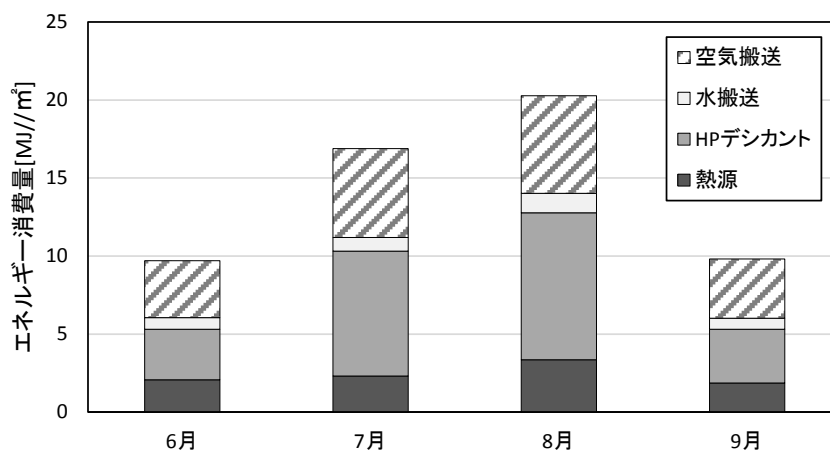


図6.21 微気流併用型放射空調エネルギー消費量算出結果（月別）

また、空調方式別の比較結果を図 6.20 に示す。26°C50%設定で運用を行う一般水式放射空調と比較して微気流併用型放射空調は微気流ファンにより空気搬送動力が増加するが、27°C55%設定温湿度緩和によるデシカント空調のエネルギー消費量削減効果から、7.4%の省エネルギーとなる。また AHU を用いた従来空調と比較して搬送動力の低減、EHP チラーの送水温度緩和効果から、39.4%省エネルギーとなることが示唆された。

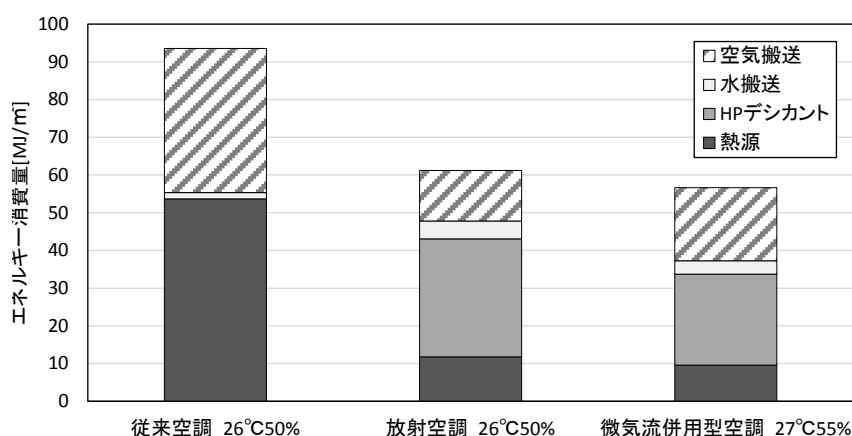


図6.22 エネルギー消費量算出結果（空調方式別の比較）

6.5 まとめ

第6章ではBEMSによるエネルギー消費量の積算と、The BEST Program と LCEM tool によるエネルギー消費量のシミュレーションを行い、以下の知見が得られた。

1. BEMS による実態調査

- ・ 設定温度を緩和することで、処理熱量が減少し、パネルの稼働時間が短くなる。このことから設定温度緩和効果は省エネルギー効果があることが明らかとなった。
- ・ BEMS によるエネルギー消費量の分析、運用調整を行っていくことによってエネルギー消費量を削減することができている。コミッショニングの重要性が明らかになった。

2. シミュレーション結果

- ・ 26°C50%設定で運用を行う一般水式放射空調と比較して微気流併用型放射空調は微気流ファンにより空気搬送動力が増加するが、27°C55%設定温湿度緩和によるデシカント空調のエネルギー消費量削減効果から、7.4%の省エネルギーとなる。
- ・ AHU を用いた従来空調と比較して搬送動力の低減、EHP チラーの送水温度緩和効果から、39.4%省エネルギーとなることが示唆された。

参考文献

1. BEST コンソーシアム：1から学ぶ BEST 実践講習会，p.Ⅱ-2.1-5，2009
2. 天井放射パネル冷暖房システムの研究（その3）LCEM ツールにおける放射パネルのモデル化 三浦克弘 大岡龍三 李栄玲 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道)2013年8月
3. 熱交換器の性能解析における対数平均温度差法の一般化 宇多村元昭 二キチンコンスタンチン 加藤共義 Thermal Science & Engineering Vol.15 No.3(2007)

7 章 総括

7 総括

本研究では、対流併用型放射空調の効果を設計や運用において考慮するために、微気流併用型放射空調を対象として実測調査及びシミュレーションを行い、気流を併用させることによる快適性向上効果と設定温湿度緩和効果を明らかにした。また、天井放射パネルの熱量測定において、2枚の放射率の異なる熱流計を用いて測定する汎用的な方法の提案を行い、放射熱量と対流熱量を精度よく分離測定することを可能とした。以下に結論を示す。

第3章では、汎用的な天井放射パネルの熱量測定方法の提案を行った。熱流計は自動車部品の測定に使用されてきた半導体からなるセンサを使用する。アルミ蒸着したセンサと通常センサの2枚の異なる放射率のセンサを同時に使用することで値の線形補間を行い、各部材の放射熱伝達量と対流熱伝達量を分離測定する。精度よい分離測定が可能であることで、設計段階でのパネル処理熱量予測を可能とし、機器能力決定などの知見となる。

第4章では、夏季冷房検証結果を示した。

天井放射空調に気流を付加することには、パネル付近における冷氣溜まりの居住域空間への対流を促進させる効果あり、気流のない一般放射空調と比較して低い室内温度が形成できることが明らかとなった。気流は人体の皮膚表面を対流冷却するため、ASHRAEと比較して快適範囲を拡大させる効果をもつ。ただし設定温度緩和効果が大きく設定湿度緩和効果は小さい。

併用する気流は、室温同温の0.1m/s～0.18m/s程度の変動微風とすることで、多くの執務者から風温、風速共に適切だという意見が得られた。従来空調と異なる室温程度の穏やかな気流が執務者の快適感を与えることから、放射空調に気流を併用させる有用性が明らかとなった。

以上より微気流併用型放射空調の快適性向上効果と設定温湿度緩和効果が明らかとなった。

第5章では冬季暖房検証結果を示した。

冬季運用方法は一般的な天井放射暖房と同じである。天井放射暖房であっても高さ100mmから1600mmにおける上下温度差が1K未満の空間に温度調和することが可能である。室温中央値が23.4℃であっても執務者の温冷感申告値は低く、主にペリメータ付近での不快申告が多かった。放射空調の適切な運用には外皮性能やペリメータ空調の運用方法が重要であると考察できる。また、湿度調和の立ち上げに時間がかかったことから、夏季には良好であった天井上で吹き出すデシカント空調の冬季運用方法の検討が必要である。

第6章ではシミュレーションにより省エネルギー効果の検討を行った。

26℃C50%設定で運用を行う一般水式放射空調と比較して微気流併用型放射空調は微気流ファンにより空気搬送動力が増加するものの、27℃C55%設定温湿度緩和によるデシカント空調のエネルギー消費量削減効果から、7.4%の省エネルギーとなる。また、AHUを用いた従来空調と比較して搬送動力の低減、EHPチラーの送水温度緩和効果から、39.4%省エネルギーとなる。以上の

結果から微気流併用型放射空調の省エネルギー効果が明らかとなった。

本研究より、微気流併用型放射空調の快適性向上効果および設定温湿度緩和に伴う省エネルギー効果が明らかになった。よって、対流併用型放射空調の有用性もまた明らかであると同時に、その気流が変動微風であることの重要性も明らかとなった。

謝辭

アンケート調査及び実測の執務室の立ち入りに関して YKK 株式会社, YKK 不動産株式会社, YKK AP 株式会社, 並びに関係者皆様に多大なるご協力を頂いたこと、深く感謝いたします。また、パネル性能検証の実測調査にあたり、株式会社デンソーの松井様は測定方法の指導や機器の貸し出しをしてくださいましたこと深く感謝いたします。測定を行う際、入館時の対応など興和不動産ファシリティーズ株式会社の皆様、ご協力頂きありがとうございました。

微気流併用型放射空調を導入した YKK80 ビルを対象とした本研究は、日建設計株式会社、東洋熱工業株式会社、鹿島建設株式会社、首都大学東京の共同研究プロジェクトです。日建設計水出様からは分析方針やプロジェクトの指針等の御指導を頂きました。同 本郷様は YKK グループの方々との取次や管理を行って下さり、報告書の添削や実測を行うにあたって土日や時間問わず指導、同行してくださりました。東洋熱工業 山田様には実測手法や分析方法、LCEM シミュレーションの御指導等、研究の細部からご指導いただきました。同 原様は断面風速分布の測定や、技術研究所での予備実測のデータ取得にあたりご協力をいただきました。同 三浦様は 2015 年実測において模擬負荷の管理など実測に関するご協力をいただきました。鹿島建設矢島様は関連会社との取次を行って下さり、施工に関する有益な情報を提供くださいました。同 東様は 2015 年実測において現場に入館する際の調整を毎日行ってくださいました。共同研究プロジェクトにおいて関係者皆様に多大なるご指導・ご協力をいただいたこと、心より感謝の意を表し、厚く御礼申し上げます。

大学では、本論文をまとめるにあたり、首都大学東京 建築学域 准教授 一ノ瀬雅之先生には分析結果や梗概、プレゼンテーションの手法などにおいて丁寧な御指導を賜りました。首都大学東京 建築学域 助教授 熊倉永子先生、並びに特任助教授 佐々木留美子先生はプレゼンテーションの御指導を賜りました。優しく御指導下さった先生方に心より感謝申し上げます。また、モックアップ実験データを引き継いで下さった須永研究室の厨まり子さん、YKK プロジェクトチームとして共同してきた倉田佐帆さん、池谷風雅さんがいなくてはプロジェクトの進行が困難でありました。各季節において行った YKK80 ビルでの実測は、一ノ瀬研究室の現 3 年生から修士課程 2 年生同期、博士後期課程の方々まで、たくさんの学生にご協力いただきました。一ノ瀬研究室に在籍する全ての学生に心より感謝申し上げます。

ここに記して、お世話になった方々に深く感謝の意を表す次第です。

2017 年 2 月

首都大学東京大学院 都市環境科学研究科
建築学域専攻 博士前期課程

木下 碧子